



EESTI MAAÜLIKOOL

Tehnikainstituut

Andres Kaljuste

**AUTONOOMNE KATKEMATU ENERGIAVARUSTUS
VÄIKEELAMULE**

OFF-GRID UNINTERRUPTED ENERGY SUPPLY FOR
RESIDENTIAL HOUSE

Bakalaureusetöö

Tehnika ja tehnoloogia õppekava

Juhendaja: Professor Andres Annuk, *PhD*

Tartu 2019

Eesti Maaülikool		Bakalaureusetöö		lõputöö
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		lühikokkuvõte		
Autor: Andres Kaljuste		Õppekava: Tehnika ja tehnoloogia õppekava		
Pealkiri: Autonoomne katkematu energiavarustus väikeelamule				
Lehekülgi: 49	Jooniseid: 17	Tabeleid: 11	Lisasid: 0	
Osakond / Õppetool: Energiakasutuse õppetool				
ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: 4. Loodusteadused ja tehnika, 4.17.				
Energeetikaalased uuringud ;				
T140 Energeetika				
Juhendaja: Andres Annuk				
Kaitsmiskoht ja -aasta: Eesti Maaülikool 2019				
<p>Töö on ajendatud soovist aidata kaasa üha suurenevale taastuvenergia osakaalule Eesti energiamajanduses. Tänu taastuvenergia tehnoloogiate arengule on nende maksumus järjest langemas ja on võimalik, et jõudnud tasemele, kus taastuvenergia on majanduslikult kasumlik. Töö eesmärk on tekitada <i>Off-Grid</i> väikeelamule sobilik võimalikult taastuvenergiapõhine energiavarustus ja hinnata selle majanduslikku tasuvust. Töös kasutati andmeid kliima andmebaasidest ja mõõdetud tarbimise andmeid. Andmeid töödeldi programmidega Microsoft Excel, PVGIS ja HOMER pro. Töö tulemusena selgus, et ühele tavalisele väikeelamule sobilik energiasüsteem peab päevas tootma 10 kWh energiat. Selle saavutamiseks oli kõige mõistlikum kasutada tuule ja päikese koostootmisjaama, et oleks aastaringselt suurema taastuvenergia osakaaluga katkematu tootlikus. Töö tulemused olid ootuspärased ja lähevad kokku seniste sarnaste uuringutega.</p>				
Märksõnad: <i>Off-Grid</i> , päikesepaneelid, elektrituulik, süvatsükkliakud, HOMER				

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Bachelor's Thesis	
Author: Andres Kaljuste		Curriculum: Engineering	
Title: Off-grid uninterrupted energy supply for residential house			
Pages: 49	Figures: 17	Tables: 11	Appendixes: 0
Department / Chair: Energy Application Engineering Field of research and (CERC S) code: 4. Natural Sciences and Engineering 4.17. Energetic Research T140 Energy research Supervisor: Professor Andres Annuk, PhD Place and date: Estonian University of Life Sciences Tartu 2019			
<p><i>This thesis is fueled from the authors desire to input into the growing capacity of green energy in Estonias energy management. Due to Tehcnological advancements the pricing of renewable energy systems the possibility of economical gain by adapting a renewable energy component into ones house is possible. The purpose of this thesis is to create a fully renewable energy based Off-Grid energy system and to evaluate it's economical return. The necessary data was acquired from climat databases and from measurments performed on a small residential house. The programs used in this thesis were Microsoft Excel, PVGIS and HOMER pro. The results of this thesis did not find anything new and ended up confirming the results of theses similar to this one done before. Like the conclusions that it is beneficial to use both wind and Solar energy to get good results and that the average daily consumption of a small residential house is near 10 kWh per day.</i></p>			
Keywords: Off-Grid, Solar Panels, Wind Turbine, Deep Cycle Batteries, HOMER			

SISUKORD

TÄHISED JA LÜHENDID	6
SISSEJUHATUS	8
1. ENERGIASÜSTEEMI KOMPONENDID	10
1.1. Autonoomseks energiavarustuseks sobivad tehnoloogiad.....	10
1.2. Päikesepaneelid.....	11
1.3. Elektrituulikud	14
1.4. Energiasalvestid	18
1.4.1. Salvestite ülesanded	18
1.4.2. Akud	19
1.5. Energia muundurid	22
1.5.1. Kontrollerid/laadijad.....	22
1.5.2. Inverterid	23
2. ENERGIASÜSTEEMILE VAJALIKUD PARAMEETRID	24
2.1. Ilmastikuolud Eestis.....	24
2.1.1. Päike	24
2.1.2. Tuul.....	25
2.2. Tarbijad	26
2.2.1. Tarbimisandmete analüüs.....	28
2.3. Energia tootjad	30
2.3.1. Päikesepaneelide parameetrid	30
2.3.2. Elektrituulikute parameetrid	32

2.4. Energia salvestid	33
2.5. Sobilikud parameetrid.....	34
3. SOBILIKE KOMPONENTIDE VALIMINE	36
3.1. Süsteemi skeem.....	36
3.2. Näidis süsteemi parameetrid, komponendid ja maksumus	37
3.3. HOMERI abil arvutatavad võrdlusparameetrid	39
3.4. HOMERIGA arvutatud Süsteemi parameetrid	39
KOKKUVÕTE	44
KASUTATUD KIRJANDUS	46

TÄHISED JA LÜHENDID

A – tiiviku pindala, m^2

AC – vahelduvvool (*Alternating Current*)

A_{Pa} – päikesepaneelide kogupind, m^2

C – akupanga mahutavus, Ah

C_t – aku mahutavus ampertundides valitud tühjenemisajal t , Ah

$C_{t(L)}$ – liitiumaku mahutavus, Ah

C_{tN} – nimimahutavus nimitühjenemisajal t_N , Ah

$C_{t(P)}$ – pliiaku mahutavus, Ah

CPV – kõrge konsentratsiooniga fotoelement (*Concentrator Photovoltaics*)

DC – Alalisvool (*Direct Current*)

E – paneelile langev kiirgushulk

E_t – päikesepaneelide tootlikus, kWh

E_c – akupanga energia mahutavus, kWh

E_{nonren} – aasta mittetaastuvenergia produktsioon, kWh/aasta

$E_{Pä}$ – päikesekiirguse aasta keskmine väärtus, kWh/ m^2

E_{served} – aasta täielik elektriline tarbimine, kWh/aasta

E_{Tar} – Päeva keskmine energia tarbimine, kWh

f_{ren} – aasta taastuvenergia kasutamise osakaal, %

H – kõrgus, m

H_{ref} – etalon kõrgus, m

k – Peukerti constant

k_H – Hellmani koefitsient

$k_{Pä}$ – päikesepaneelide efektiivsus, %

$MPPT$ – maksimaalse võimsuse punkti järgiv (*Maximum Power Point Tracking*)

Off-grid – võrgu ühenduseta energia süsteem

On-grid – võrguga ühendatud energia süsteem
 P_n – elektrituuliku nimivõimsus, W
 P_t – elektrituuliku võimsus, W
 PV – fotoelement (*photovoltaic*)
 PVGIS – Photovoltaic Geographical Information System
 PWM – Pulsilaiusmodulatsioon (*Pulse Width Modulation*)
 R_a – Rayleigh'i jaotise väärtus
 t – päikesetundide arv aastas, h
Thin film - sadestatud kilega
 U_c – akupanga pinge, V
 V – keskmine tuule kiirus, m/s
 VAC – teatud pingega vahelduvvool (*Volt Alternating Currnet*), V
 V_n – nimituulekiirus, m/s
 Wh_{aastas} – energiatootlikus aastas, Wh
 ρ – Õhu tihedus normaalingimustel, kg/m³

SISSEJUHATUS

Taastuvenergia osakaal energiamajanduses on viimaste aastate jooksul järjekindlalt kasvanud ning kõikide eelduste kohaselt kasv jätkub [1]. Lisaks riiklikul tasemel taastuvenergia osakaalu suurenemisele on tänu tehnoloogia arengule ja inimeste keskkonna teadlikuse kasvule tekkinud suurenev nõudlus ka taastuvenergia kasutamise järele väikeelamute sektoris. Jättes välja taastuvenergia kasutamise omaette eesmärgina on nõudlust suurendav fakt, et taastuvenergia kasutamine on pigem suure tootlikusega pikemaajaline investering. Eesti Energia kodulehel pakutakse erakliendile 8600 € maksva 12,7 aastase tasuvusajaga 8 kW võimsusega *On-Grid* (võrguühendusega) päikesepaneelide süsteemi, mis peaks tagama tavalise (ilma PV-ta) võrguühendusega süsteemiga võrreldes rahalise võidu aastas 670 € [2]. Uuele elamule, mis ehitatakse kohta, kus võrguühendus puudub võib taastuvenergiasüsteemi rakendamine olla kordades odavam, kui võrguga liitumine. Ka Euroopa liidus on erinevaid taastuvenergia toetusi, mis suurendavad potentsiaalset majanduslikku kasu veel.

Off-Grid (võrguühenduseta) energia süsteeme on Eestis hetkel vähe, kuid töö autori arvates tulevikus nende arvukus tõenäoliselt suureneb tingituna peamiselt soovidest, keskkonnasäästlikusest või majanduslikust kasust. *Off-Grid* süsteemi planeerimiseks väikeelamu energiavarustuseks on palju võimalusi, see töö keskendub võimalikult taastuvenergia põhise süsteemi leidmisele.

Töö koosneb kolmest osast:

1. Töö esimene osa koosneb ülevaatest hetkel kasutatavatest tehnoloogiatest ja nende sobivusest eesmärgi täitmiseks.
2. Töö teine osa seisneb andmete kogumises ja arvutustest süsteemile vajalike parameetrite planeerimiseks. Arvutused said tehtud Eesti kliima andmete ja ühe eramu tarbimisandmete põhjal. Kliima andmed tulevad interneti andmebaasidest.

Tarbimisandmed said kogutud mõõtmistega ja töödeldud programmiga Microsoft Excel. Osa arvutustest sai teostatud programmiga PVGIS.

3. Töö kolmas osa koosneb realistliku näidis süsteemi koostamisest, kasutades sobilikke parameetreid ja süsteemi analüüsist. Süsteemi analüüsiks sai koostatud programmiga HOMER Pro simulatsioonid.

Töö eesmärgiks oli planeerida Eesti tingimustes võimalikult keskkonnasõbralik ja vähe hooldust vajav *Off-Grid* taastuvenergia süsteem, võimekusega produtseerida päevas piisavalt energiat ja selle käigus tekitada lähtematerjal tulevikus sarnaste süsteemide planeerimiseks. Töö käigus oli oluline osa ka majanduslikul tasuvusel.

1. ENERGIASÜSTEEMI KOMPONENDID

1.1. Autonoomseks energiavarustuseks sobivad tehnoloogiad

Taastuenergia kasutamine on muutunud iga aastaga järjest populaarsemaks ja mahukamaks nii Eestis kui ka ülejäänud maailmas. Selle üheks põhjuseks on fossiilsete kütuste kasutamise negatiivsed keskkonnamõjud võrreldes taastuenergiaga. Teiseks põhjuseks on inimeste teadlikus asjaolust, et mingil hetkel saavad fossiilsed kütused otsa või muutub nende kätte saamine liialt kulukaks, mis paneb maailma tegutsema alternatiivse lahenduse suunas. Selle tulemusena on hakanud tekkima ka taastuenergiasüsteemide hinna alanemine ja fossiilsete kütuste hinna tõus, mis soodustab taastuenergia kasutusele võttu veelgi enam.

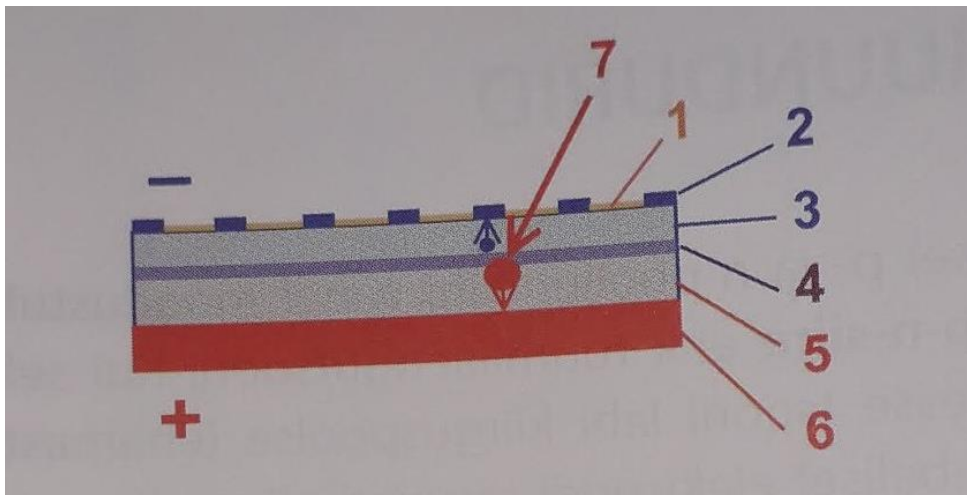
Kuna eesmärgiks on ehitada nii keskkonnasõbralik kui ka püsiv lahendus, on oluline see teha võimalikult töökindel ja minimaalselt amortiseeruv. Sellest tulenevalt sobivad primaarseks energiaallikaks põleva kütuseta taastuenergiat kasutavad tehnoloogiad.

Olemasolevatest taastuenergia tehnoloogiatest on Eesti tingimustes praegu ühele eramule elektri tootmise eesmärki silmas pidades mõistlik rääkida päikesest, tuulest ja natuke vähem ka hüdro-jaamadest. Jättes tahaplaanile taastuenergia süsteemid, mida on liialt keeruline või kallis rakendada. Selles töös jätame välja ka hüdrogeneraatori võimaluse ja keskendumise tuule ja päikese energia kasutamisele primaarse allikana, sest hüdrogeneraatori kasutamine võimalus on liialt tihedalt seotud eramu asukohaga.

Põleva kütusega töötavad generaatorid ja küttesüsteemid sobivad sellisesse süsteemi tagavara lahendusteks ja toetuseks, kui on lühiajaliselt suurema võimsuse vajadus. Kusjuures kütuseks on võimalik kasutada ka taastuvaid lahendusi nagu biokütus ja biomass.

1.2. Päikesepaneelid

Päikesepaneelid (päikesepatareid) muundavad päikesekiirguse energia elektrienergiaks. Paneelid koosnevad kombineeritult jada- ja rööpühendusega fotoelektrilistest elementidest. Fotoelektriliste muundurite hulgast on energeetikas kasutuses peamiselt ventiilfotoelemendid. Ventiilfotoelementides kasutatakse kõige rohkem pooljuhti räni. Kuigi on võimalus kasutada erinevaid materjale, siis kõige levinum ränifotoelemendi ülesehitus on näha joonisel 1.1. [3]



Joonis 1.1. Ränifotoelemendi ehituspõhimõte [3].

Joonise tähistest selgitus: 1 - peegeldusvastane kiht, 2 - ribaline NiCr-elektrood, 3 - n-pooljuht (näiteks fosfordoteeringuga räni), 4 - p-n siire, 5 - p-pooljuht (nt boordoteeringuga räni), 6 - metallelektrood, 7 - footon ja selle toimet tekkivate laengukandjate paar.

Üks tähtsaim päikesepaneelide omadusi on kasutegur (efektiivsus), mis näitab kui suur osa paneelile langevast päikesekiirgusest on võimalik muundada elektri energiaks. See on oluline näitaja, sest sageli on pind kuhu paneele saab asetada piiratud ja suurema kasuteguriga paneelid võtavad sama võimsuse saavutamiseks vähem ruumi. Erinevate tehnoloogiate võrdluse lihtsustamiseks on toodud välja Tabelis 1.1. nende kasutegurid. Loomulikult ei ole kasutegur ainus võrdluskriteerium ja kõigil on omad eelised ja puudused.

Tabel 1.1. Fotoelementide kasutegureid [3]

Fotoelemendi ehitus ja materjal	Kasutegur %
Kolmesiirdeline kiirguskontsentraatoriga tandemfotoelement	35 ... 43
Kahesiirdeline kiirguskontsentraatoriga tandemfotoelement	30 ... 32
Galliumarseniidfotoelement	24 ... 26
Monokristall-ränifotoelement	20 ... 24
Polükristall-ränifotoelemnt	18 ... 23
Vask-indium-seleniid-kilefotoelement	18 ... 20
Kaadiumtelluriid-kilefotoelement	14 ... 17
Amorfne ränifotoelement	8 ... 10
Orgaaniline fotoelement	4 ... 8

Kolmesiirdelised ja kahesiirdelised elemendid tunduvad Tabeli 1.1. põhjal olevat teistest kõvasti efektiivsemad ja järelikut ka paremad. Selle kõrge efektiivsuse põhjuseks on tehnoloogia, mis kasutab ühes paneelis mitut erinevat pooljuhti selleks, et püüda korraga päikesevalgusest erinevate lainepikkustega energiat. Tüüpiliselt on paneelides kasutusel ühte tüüpi pooljuht. Selle tehnoloogia suur miinus on keerulisest konstruktsioonist tingitud konkurentsivõimetult kallis hind. Seetõttu on nende kasutus siamaani piiratud näiteks kõrge kontsentratsiooniga päikeseenergia süsteemides (*Concentrator photovoltaics (CPV)*), kus kasutatakse läätsesid ja peegleid, et väiksele pinnale palju valgust keskendada ja sellega efektiivseid paneele maksimaalselt ära kasutada, muutes hinna ja produktiivsuse suhte aksepteeritavamaks.

Ränikristall elementidega paneelidel on tootmisel põhimaterjaliks räni. Turul olevate polü-, multi- ja monokristalliliste paneelide nimetused tulevadki ränitüübist, mis nendes paneelides kasutatakse. Monokristalsed paneelid on multikristalsetest paneelidest pisut kallimad ja efektiivsemad aga erinevused nende vahel on praegusel ajal piisavalt väikesed, et need eriti suurt rolli eramu tarbimise rahuldamises ei mängi ja neid võib käsitleda, kui sama tüüpi paneele ning valikul keskendada teistele parameetritele. Nende tootmine on ka piisavalt odav ja hetkel on need kõige populaarsemad eramutes kasutamiseks. Kuna paneelid on reeglina

metallraamistikuga ja ristkülikukujulised plaadid, kus puuduvad liikuvad osad, on nad üldiselt väga töökindlad ning vajavad vähe hooldust.

Sadestatud kilega (*Thin film*) ehk kilefotoelementidega paneelid on võrreldes kristallpaneelidega palju mitmekülgsemad. Olenevalt konkreetsest paneelist võivad nad olla palju odavamad ja vähem efektiivsed või palju kallimad ja isegi efektiivsed. Võrreldes kristallpaneelidega on see tehnoloogia veel arengujärgus. *Thin-film* paneelide eripäraks on nende õhuke ja kerge konstruktsioon, mis võimaldab rohkem kasutusvaldkondi, mida suurendab veel painduvate paneelide tehnoloogia.

Amorfse ränifotoelemendi eeliseks on kristalliliste ränielementidega võrreldes kõvasti madalam hind ja võimekus kasutada neid elemente akende klaasi peal, kuna need on läbipaistvad ja nii õhukesed, et klaasi läbipaistvust mõjutavad minimaalselt [3]. Lisaks eelnevatele on veel uuemaid tehnoloogiaid orgaaniliste elementidega aga need ei ole veel konkurentsivõimelised.

Päikesepaneelide tehnoloogiad on tänapäeval pidevas arenduses ja tõenäoliselt muutub see tehnoloogia veelgi populaarsemaks ja odavamaks tuues seda tavakasutusse järjest kiiremini. Üks tähelepanuväärsemaid eestvedajaid igasuguste elektrisüsteemide populariseerimises on elektriautode tootjana tuntud firma Tesla. Üks toodetest mida Tesla lisaks elektriautodele pakub on ka uuenduslikud päikesepaneelid, mis erinevad võimalusega täielikult asendada katusekivid olles vastupidavuselt kividest isegi tugevamad ja välimuselt soovipäraselt disainitavad. Tesla pakub päikesepaneelidest katusekividele nii öelda lõpmatu garantii, sest need on toodetud karastatud klaasist ja peaksid kõikidele ilmastikutingimustele probleemideta vastu pidama. Energiatootmise garantii nendest paneelidest antakse kolmekümme aastaks [4]. Maksumuselt on need kindlasti kallimad kui tavalised paneelid või tavaline katus aga selle süsteemiga pakutakse kaks ühes lahendust, mis peaks olema väga töökindel ja ilusa disainga sobilik igasse keskkonda. Praegu on tehnoloogia veel viimastes testimiste ja arendamise faasides ja peaks lähimate aastate jooksul masstootmisesse tulema.

1.3. Elektrituulikud

Elektrituulikud jagunevad konstruktsiooni järgi peamiselt kaheks: horisontaalse teljega ja vertikaalse teljega (rootortuulik) versioonideks. Neid kahte klassi saab omakorda väga paljudeks erinevateks osadeks jagada, sest tehnoloogiaid on palju ja neid leiutatakse veel juurde. Lisaks konstruktsiooni järgi jaotusele on võimalik neid jaotada ka võimsuse ja muude parameetrite järgi. Tabelis 1.2. on mõned väiketuulikute klassifikatsioonide näited, millest tähtsaim on Rahvusvahelise Elektrotehnika Komitee standard IEC 61400-2 [17].

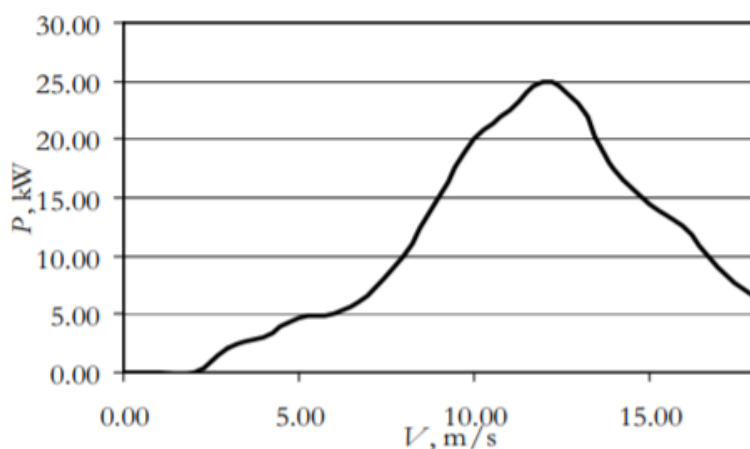
Tabel 1.2. Väiketuulikute klassifikatsioonid [17]

Rahvusvahelise Elektrotehnika Komitee standard IEC 61400-2	Rootori pindala $< 200 \text{ m}^2$ (ehk horisontaalse tuuliku puhul $D < 16 \text{ m}$), generaatori ping vähem 1000 V.a.c. või 1500 V.d.c.
Briti Tuuleenergia Assotsiatsioon	Mikrotuulik 0 – 1,5 kW Väiketuulik 1,5 – 15 kW Väike-keskmine tuulik 15 – 100 kW
Saksamaa Tuuleenergia Assotsiatsioon	Mikrotuulik 0 -5 kW Minituulik 5 – 30 kW Keskmine tuulik 30 -100 kW (äriettevõtted ja maamajandus)
Taani Tuulikuomanike Assotsiatsioon	Kodumajapidamise tuulik: maksimaalne kogukõrgus $< 25 \text{ m}$ rootoridiameter $< 13 \text{ m}$ maksimaalne nominaalvõimsus $< 25 \text{ kW}$

Eesti Tuuleenergia Assotsiatsiooni korraldatud väiketuulikute ümarlaval jaanuaris 2012. a. otsustati Eestis väiketuulik defineerida tuuliku kogukõrgusega kuni 30 m. Tuuliku kõrgus ja rootori pindala omavad visuaalse poole pealt rohkem mõju tuuliku suuruse määratlemiseks kui tuuliku nominaalvõimsus. [17]

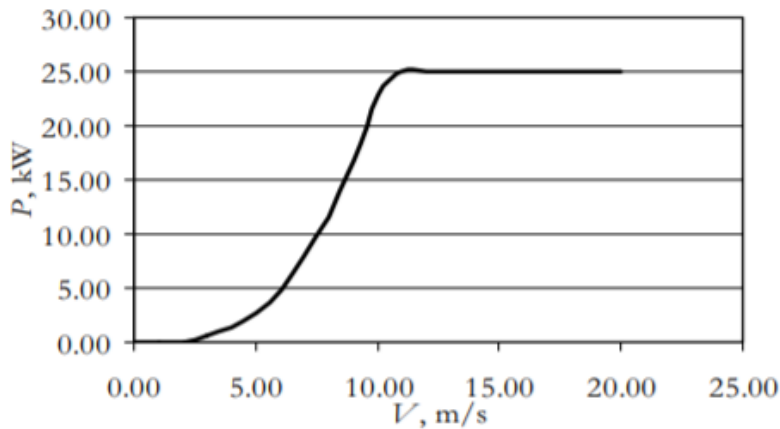
Selle töö raames keskendume horisontaalse teljega väiketuulikutele, sest just selline tuulik võiks sobida ühele eramule elektri tootmiseks. Elektrituulikute valikul peab tähelepanu pöörama tuuliku võimsuskõverale, mis on sõltuvuses tuule kiirusest seda nimetatakse ka tuuliku võimsuskarakteristikuks.

Eestis peaks sobima väiketuulikud, mis hakkavad töötama juba 2,5 m/s tuulekiiruse juures ja suudavad madalatel tuulekiirustel efektiivselt toimida. Puudub vajadus suurtel tuulekiirustel (>10 m/s) töötamiseks, sest selliste tuulte esinemissagedus on väike. Sobiliku tuuliku võimsuskarakteristik võiks olla sarnane joonisele 1.2, kus on kujutatud tuulik, mis hakkab tööle madalatel tuulekiirustel ja jõuab maksimumvõimsuseni 11- 14 m/s tuultekiiruste juures. Sellise võimsuskarakteristikuga tuuliku eelis võrreldes tüüp A võimsuskarakteristikuga tuuliku ees seisneb suuremal tootlikusel 3- 6 m/s tuultekiirustel, mis on Eestis levinud [13].



Joonis 1.2. Tuulivoimala WP20kW tuulegeneraatori võimsuskarakteristik tüüp B [15].

Joonisel 1.3. on toodud A tüüpi võimsuskarakteristikuga tuulik, mis on mõeldud töötama tuulekiirustel 11- 25 m/s ja hoidma oma maksimumvõimsust stabiilsena selle saavutamise korral. Sellised tuulikud Eestis väiksemaks tootmiseks sobivad vähem, sest madalamatel tuulekiirustel on nende tootlikus pisut halvem. Samas on tüüp A võimsuskarakteristikuga tuulikud levinumad ja suuremal tuulekiirusel ehk tuultekiirustel > 7 m/s tootlikumad.



Joonis 1.3. Elotec WindRunner 11-25 tuulegeneraatori võimsuskarakteristik tüüp A [15].

Elektrituuliku tootlikuse arvutamisel mängib olulist rolli ka sagedusjaotus ehk kui kaua aega mingi teatud tuulekiirus esineb. Kasutades arvutustes ainult keskmist tuulekiirust ei arvestata miinimum ja maksimum tuulekiiruste ajalise jaotuste erinevustega ja kuupsõltuvus tuulekiirusest ei lase sellisel viisil täpseid arvutusi teha. Maksimum ja miinimum tuulekiirused on ka olulised, sest teatud tuulekiirusest allapoole jäädes muutub tuuliku tootlikus olematuks ja liialt suured tuuled ohustavad tuulikut ja kogu süsteemi ülekoormusega. Seepärast on tuulegeneraatori valikul väga oluline arvestada kohalike tuulekiirustega ja elektrituuliku valikuks kasutada järgnevaid valemuid, kus on sees vajalikud muutujad [11].

$$P_t = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p, \quad (1.1.)$$

kus P_t on elektrituuliku võimsus (W), ρ on õhu tihedus normaaltingimustel ($\rho = 1,226 \text{ kg/m}^3$), A tiiviku pindala (m^2), V tuule kiirus (m/s) ja C_p elektrituuliku kasutegur (%).

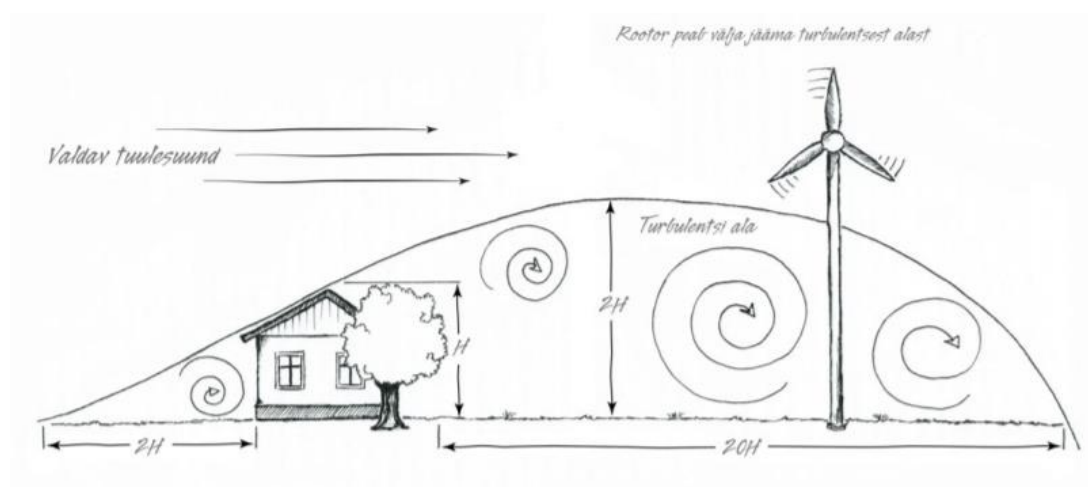
Kui eemaldada sellest valemist elektrituuliku kasutegur C_p saame teada, kui palju tuule energiat tiivikut mõjutab. Elektrituuliku kasutegur saab maksimaalselt olla 59 % ja jääb tavaliselt suurematel tuulikudel vahemikku 30- 50% ning väiksematel tuulikudel 20- 35%.

Selleks, et arvutada edasi veel ka aasta tootlikus ehk kui palju energiat selliste parameetritega tuulegeneraator tekitab, tuleb valemisse lisada Rayleigh'i jaotus, et saada ligikaudne tuulekiiruste sagedusjaotus ja korrutada see läbi tundide arvuga aastas.

$$Wh_{aastas} = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p \cdot Ra \cdot 8760 \quad (1.2.)$$

Kus Wh_{aastas} on energia aastas (Wh), Ra on rayleigh'i jaotise väärtus, mis Eestis on kahe lähedal ja 8760 on tundide arv aastas.

Lisaks eelnevale mõjutab tuulikute tööd ka tuulikut ümbritseva maastiku karedustegur, mis sõltub maastiku takistuste tõttu tekkivast turbulentsist. Turbulents ehk õhukeerised on tuule korrapärase liikumine, mis vähenda tuuliku tootlikust [18].



Joonis 1.4. Turbulentsi ala [18]

Jooniselt 1.4. on näha kuidas takistused tuult mõjutavad ja ligikaudsed mastaabid mõju kauguste ja kõrguste osas. Kuidas karedustegur tuulikut mõjutab on väljendatud valemiga 1.3.

$$v = v_{ref} \left(\frac{H}{H_{ref}} \right)^{k_H}, \quad (1.3.)$$

Kus V on keskmine tuulekiirus kõrgusel H_{ref} m/s, H_{ref} on etalon kõrgus m, H on kõrgus m ja k_H on Hellmani exponent

Karedusteguri vähendamiseks on tavaline lahendus tuuliku masti pikendamine. Kõrgemal on tuulikud üldiselt ka suuremate tuulekiiruste tõttu tootlikumad.

1.4. Energiasalvestid

1.4.1. Salvestite ülesanded

Selle töö raames on oluline selgeks teha, mis on *Off-Grid* süsteemis energiasalvesti eesmärk. Taastuenergia üks suuremaid probleeme on selle ebastabiilsus. Selle põhjustajaks on energia tootmise mahu sõltuvus alati muutlikust ilmast. Kui toodetud energia tootmise ja selle energia tarbimise aeg ei ühildu, siis iseseisva ehk *Off-Grid* süsteemi puhul energia vahepealse salvestamise võimaluseta läheks see lihtsalt raisku. Süsteemi stabiilsuse ja funktsionaalsuse parandamiseks on seega võimalik kasutada energia salvestamist.

Taastuenergia allikatest elektrit tootes (PV- paneelid ja elektrituulikud) on salvesteid võimalik kasutada järgmiselt:

1. Ühildada taastuenergiaallikate väljundvõimsus tegeliku koormusega, tasandada taastuenergiaallika väljundvõimsuse kõikumisi või kasutada reservtoiteallikana olukorras, kui taastuenergiallikas elektrit ei tooda (peamiselt oluline elektrikvaliteedi tagamiseks)
2. Salvestada liigne taastuenergia koormuse madalseisus, et kasutada seda koormuse kõrgseisus. [7]

Salvestite kasutamise eesmärkidest lähtudes saab tuletada taastuenergiat kasutava *Off-Grid* süsteemi jaoks sobilikud salvestite omadused. *Off-Grid* energiasüsteemi jaoks on tähtsamad omadused:

1. Salvesti kõrge eluiga ehk suur laadimise tsüklite arv. See on oluline, et vältida süsteemi liialt kiiret vananemist. Salvesti on üks kallimatest energiasüsteemi komponentidest, mille äratasuvus on tihedalt seotud selle elueaga.

2. Süvatsükkli võimekus ehk salvesti võime töötada efektiivselt ka korduvalt peaaegu täielikult tühjenedes. Paljud energiasalvestid ei ole veel sellist võimekust saavutanud ja suudavad pikaajaliselt töötada tühjenedes kõigest 50 % ulatuses. Taastuvenergiasüsteemis esineb perioode, kus on pikaajaliselt tootmiseseadmed väikse võimsusega ja salvesti võime sellistel hetkedel kogu salvestatud energia kasutusele võtta on väga oluline.
3. Kõrge efektiivsus ehk kui palju salvesti laadimiseks kasutatavast energiast saab sealt tagasi. Kõrgema efektiivsusega salvestid vajavad vähem ruumi ja on väiksema mahtuvusega.
4. Salvesti peab olema võimeline välja andma piisavalt võimsust ehk on alampiirid millest madalama võimsusega salvestite kasutamine ei ole mõistlik.
5. Salvesti peab olema sobiva energiamahutavusega, et rahuldada tarbimisvajadusi.

Vähem tähtsad on paljudele tarbeelektroonikas ja elektrisõidukites kasutatavate salvestite nõuded, kus on olulised ka massi ja mahu minimeerimine ehk võimalikult suure massienergia (Wh/kg) või mahuenergia (Wh/m³) saavutamine. *Off-Grid* energiasüsteemi puhul on nende tähtsus väiksem, sest puudub vajadus salvesteid liigutada ja on ruumi nende hoiustamiseks.

1.4.2. Akud

Akud on oma olemuselt elektrokeemilised salvestid, sest nad töötavad muundades keemilistest protsessidest tekkivat energiat elektriks ja vasutpidi. Akud erinevad keemiliste komponentide poolest ja ka ehituselt, meie jaoks on tähtsamaid omadused akude eluiga, töökindlus, energeetilised näitajad ja maksumus. Üks tähtsamaid aku omadusi on aku mahutavus, mida kirjeldatakse enamasti ampertundides (Ah). Aku mahutavust arvutatakse korrutades tühjenemisvoolu ajaga, mis läheb sellleks, et aku jõuaks miinimum klemmipingeni. Aku mahutavust mõjutavad 5 põhitegurit [7]:

1. Mõõtmised: koos mahutavusega kasvab ruumala ja elektrodide pindala,
2. Temperatuur: jahtudes aku tühjenemismahutavus väheneb,
3. Miinimumpinge: paljudel akutüüpidel võib koormamine allpool miinimumpinget kaasa tuua aku riknemise,
4. Tühjenemisvool: mida enam akut koormata, seda väiksemaks muutub tema mahutavus,

5. Senine ekspluatatsioon: laadimis – tühjenemisvoolu tugevused, tsüklite sagedus, temperatuuri vahemikud, aku vanus jne .

Sammuti oluline näitaja on aku klemmipinge, see erineb suuresti erinevate aku elementide raames. Turul olevatest akudest on eramu energiavarustuses mõistlikuks valikuks olevad akutüübid toodud välja tabelis 1.3.

Tabel 1.3. Sobilikud akutehnoloogiad ja nende võrdluskriteeriumid [7, 9]

Nimetus	Uputatud pliiakud (FLA, flooded lead-acid)	Ventiilreguleeritavad Pliiakud (valve-regulated lead-acid VRLA)	Liitium- ioonakud	Soolaveega akud
Tühjenemis sügavus (DOD)	50-80%	50-80%	80-100%	100%
Eluiga	5 -10 aastat	5-10 aastat	10-20 aastat	10-15 aastat
Suhteline Maksumus	100%	120%	300%	200%

Kahte sorti pliiakud on hetkel turul kõige odavamad ja veel ka kõige levinumad akud koduste elektrijaamade tarbeks. Selle peamiseks põhjuseks on nende odav hind, mis on tingitud pigem lihtsamast ehitusest ja tehnoloogia küpsusest, kuna pliiakud on turul olnud juba väga pikalt. Nende põhiliseks puuduseks on ka süüvatsüklivõimekuse puhul pigem lühike eluiga ja võrreldes uuemate konkurentidega kehv koormustaluvus ja madalam efektiivsus. Efektiivsus on konkureerival tasemel VRLA tüüpi akudel, mille hulka kuuluvad ka geelakud ja AGM tüüpi akud.

Liitium-ioonakud on kõige paremate omadustega olles võimelised ka suure tühjenemise sügavuse juures pikalt vastu pidama. Lisaks sellele on oluline välja tuua liitiumakude võime pikaajaliselt välja anda suurt võimsust, ilma et see akut rikuks.

Laengumahutavuse sõltuvust koormusvoolust iseloomustatakse Peukerti valemiga [7]:

$$C_t = C_{t,N} \cdot \left(\frac{t}{t_N}\right)^{k-1} \quad (1.4.)$$

Kus C_t on aku mahutavus valitud tühjenemisajal t , Ah, C_{tN} on nimimahutavus nimitühjenemisajal t_N , Ah ja k on Peukerti constant.

Peukerti konstant sõltub akutüübist (Tabel 1.4.), liitiumakudel on see parem. Siin tasub mainida, et tabel ei ole täielikult täpne, vaid ligikaudseks hindamiseks sobilik, sest igal seadmel on tegelikkuses konstant pisut erinev ja tasub uurida seadmete andmelehti.

Tabel 1.4. Peukerti konstandi k ligikaudsed väärtused sõltuvalt akutüübist [7,9]

Akutüüp	k
Süvatsükkliga pliiaku	1,3
Absorbeetud klaasmattelektrolüüdiga pliiaku	1,2
Liitium- raudfosfaataku	1,1
Liitium-nikkel-mangaan-koobaltoksiidaku	1,03
Liitium-titaanakku	1,07
Soolavee aku	1,2

Mida väiksem on Peukerti konstandi väärtus seda parem on aku koormustaluvus. Võrreldes süvatsükkliga pliiakut ja liitium- raudfosfaataku selgub et, pliiaku $C_{t(P)}$ langeb võrreldes liitiumaku $C_{t(L)}$ -ga märkimisväärselt rohkem.

$$C_{t(P)} = 200 \cdot \left(\frac{5}{20}\right)^{1,3-1} = 131,95 \quad (1.5.)$$

$$C_{t(L)} = 200 \cdot \left(\frac{5}{20}\right)^{1,1-1} = 174,11 \quad (1.6.)$$

Süsteemi koostamisel peab kindlasti sellega arvestama. Seda mitte tehes võib tekkida olukord, kus akupank ei vasta nõuetele hoides vähem energiat, kui planeeritud ja vananeb suure koormuse tõttu kiiremini. See omadus töötab ka vastupidiselt ehk laadimise ajal, mis annab võimaluse lühema perioodi jooksul kasutada võimsamat laadimisvoolu. See on päikese ja tuuleenergia puhul vägagi oluline efektiivsuse saavutamiseks, sest võimaldab tippvõimsusi rohkem ära kasutada.

Peamised liitiumakude puudused on nende kallim hind ja temperatuurimõjutused. Üks kallima hinna põhjuseid on see, et liitumielementide täielik tühjenemine rikub ka akud, seetõttu on

enamus süsteemidele sisse ehitatud kaitsemehanismid, mis takistavad neil kriitilise piirini jõudmist.

Liitiumakudest teevad paljud tuntud firmad nagu Pika, LG ja Tesla akusüsteeme, mis pakuvad mahtuvusi 5-15 kWh ringis salvestustehnoloogiat garantiiga 10 aastat selliselt, et süsteemi mahtuvus ei vähene rohkem kui 30 % [10]. Hetkel on need süsteemid piisavalt nõutud, et pakkumine ei jõua järgi ja inimesed ootavad järjekordades, et endale sellist süsteemi saada.

Soolaveeakud on uuem tehnoloogia, mille peamiseks eeliseks on nende täieliku tühjenemise võimekus (*Depth of Discharge*), mis peaks olema 100% [9]. Võrreldes liitium-ioon akudega on nende koormustaluvus pisut kehvem ja nad vajavad suuremat pinda väiksema energiatiheduse tõttu. Soolaveeakud on veel uus tehnoloogia aga need akud peaks olema tulevikus asenduseks pliiakudele energiasüsteemides olles juba odavamad, kui liitiumakud ja paremate omadustega kui pliiakud. Uuritakse tehnoloogiat, mis ühendaks omavahel soolaveega akude ja pliiakude tehnoloogiad loomaks energiasüsteemide tarbeks võimeka süvatsükkliaku .

1.5. Energia muundurid

1.5.1. Kontrollerid/laadijad

Üldiselt kasutatakse *Off-Grid* energiasüsteemis laadimiskontrollereid (*Charge Controller*) mille põhiparameetrik on maksimaalne voolutugevus, sest suurem osa kontrolleritest suudab töötada erinevatel pingetel. Võimsus vastab süsteemi pingele kasvades pinge suurenedes. Kontrollerid jagunevad kahte suuremasse rühma. PWM (*Pulse Width Modulation*) kontrollerid on lihtsama ehitusega ja tavaliselt ka väiksema võimsusega ning odavamad. MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) kontrollerid on kallimad aga tänu keerulisemale ehitusele, mis erinevalt PWM kontrollerist võimaldab hoida ühtlast väljundpinget erinevate

sisendpingete korral annab MPPT kontrolleri keskmiselt ka 30% rohkem energiat samadest paneelidest [5].

Laadija suurim laadimisvool peaks olema umbes 10 % akupanga mahutavusest. Energiasüsteemidele mõeldud inverterid on sageli samal ajal ka akude laadijad. Praegusel ajal on mõistlik alati kasutada automaatset laadijat, mis suudab ise reguleerida laadimisvoolu ja pinget sõltumata sisendi parameetritest. Sellised laadijad suudavad vastavalt aku laetuse tasemele muuta laadimisvoolu parameetrid pikendades sellega aku eluiga. [5]

1.5.2. Inverterid

Off-Grid süsteemi jaoks on vajalikud AC/DC inverterid, mis muudavad vahelduvvoolu alalisvooluks ja konverterid, mis muudavad alalisvoolu vahelduvvooluks lisaks muude parameetrite nagu pingi ühildamisele tarbijate parameetritega.

Inverterite olulisemad parameetrid on süsteemile sobilik pingi ja võimsus. Eestis ostetud elektriseadmed on mõeldud töötama peamiselt võrgustandardiga 230 VAC 50 Hz. Suuremate inverterite võimsuste korral on võimalik invertereid panna koos töötama nii, et üks on juht ja ülejäänud alluvad aga seda ei tohi teha inverteritega, mis ei ole selleks mõeldud. Inverterid, mis ei ole mõeldud koos töötama ei suuda omavahel vahelduvvoolu faasi sünkroniseerida. [5]

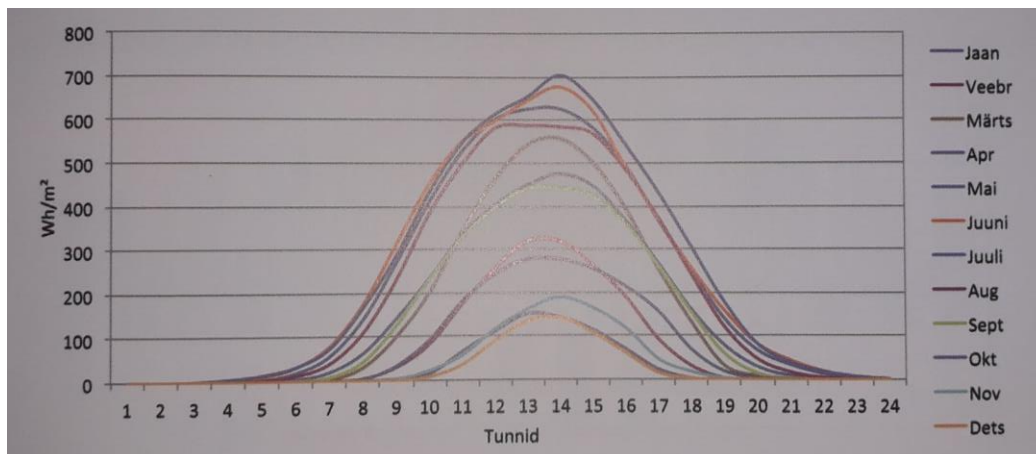
Taastuenergiatsüsteemis on kasutusel täiuslikumad inverterid, mida nimetatakse juhtinverteriteks või võrguinverteriteks. Seda sorti inverteritel on sageli mitu sisendit ja väljundit võimaldades mitut erinevat funktsiooni. Juhtinverterid on ehitatud selliselt, et nad oleks võimelised energiasüsteemi keskusena toimima olles võimekusega laadida akusid ja välja anda võrgupinget.

2. ENERGIASÜSTEEMILE VAJALIKUD PARAMEETRID

2.1. Ilmastikuolud Eestis

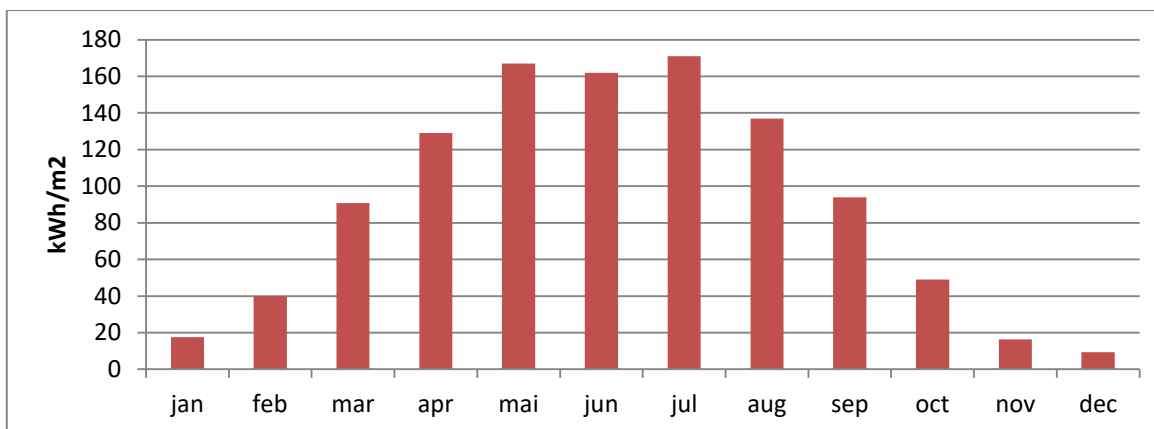
2.1.1. Päike

Joonisel 2.1. on kujutatud eraldi kuude keskmisi päikesekiirguse energia koguseid. On näha erinevusi nii kiirguse intensiivsuses kui ka päikesetundide koguses. Eesti aastane päikesetundide arv on 1600-2000 tundi [12,14]. Suvekuudel ligikaudselt keskmiseid päikesetunde ühes kuus vahemikus 200-300 tundi ja talvekuudel 50 tundi või vähem kuus. Kevadel ja sügisel on päikesetunde vahemikus 100-200.



Joonis 2.1. Keskmiste päevade summarne päikesekiirgus 45- kraadise kaldega pinnale [7].

Joonisel 2.2 on näha kuude päikesekiirguse energia suuruste kõikumist. Erinevus suve ja talvekuude vahel võib olla lausa kümnekordne. Erinevate andmebaaside näitajad on pisut erinevad aga suurusjärgud on sarnased.

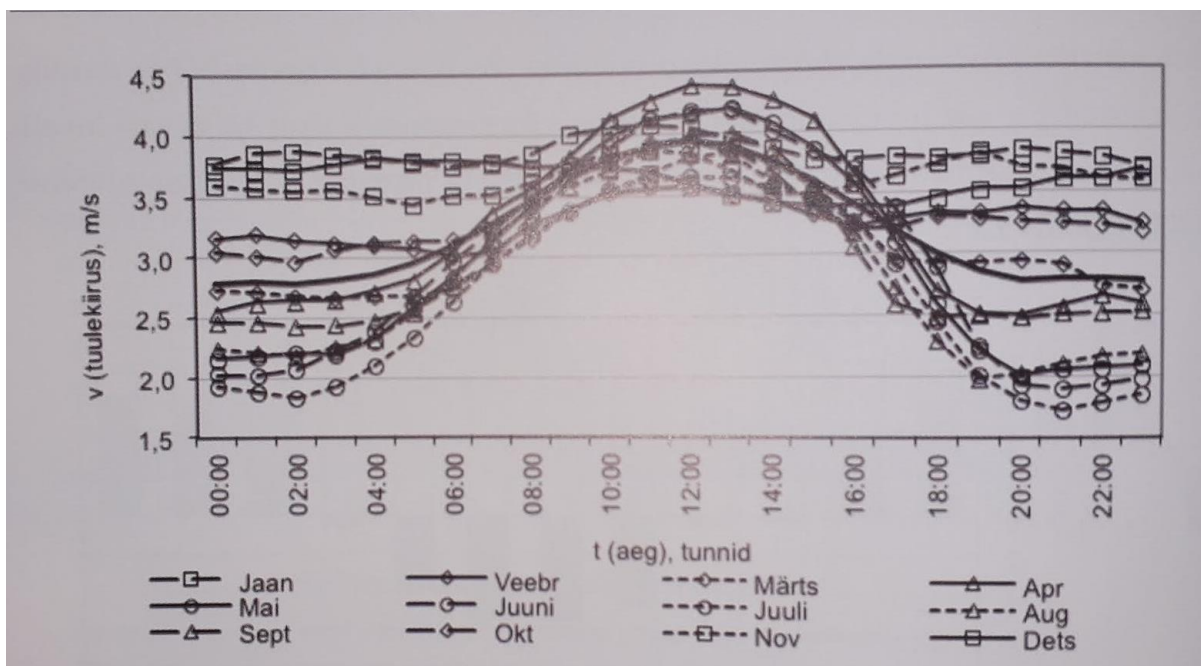


Joonis 2.2. Päikesekiirguse energia kogus kWh/m² kuus PVGIS andmebaasist.

Päikeseenergia kasutamiseks on oluline teada, kui palju päikesekiirgust elektritootmis asukohas on ja kui kaua on päikesetunde päevas ehk kui kaua aega on võimalik energiat toota enne, kui päikesevalgus kaob. Päikesekiirgusvõimsuse koguse teadmine on oluline, kuna paneelide võimsused ja volt-amper karakteristikud on antud teatud päikese kiirgusvõimsusega, tavaliselt 1000W/m² ja temperatuuriga 25 °C. Kui kohapeal on otsese päikesekiirguse võimsus 500 W/m² kohta [14] siis on paneeli võimsuse näitajad mõnevõrra väiksemad. Sarnaselt on lood temperatuuriga, kuna paneeli pinna temperatuuri alanedes võimsus tõuseb ja temperatuuri kasvades langeb. Eesti keskmine temperatuur aastaringis jääb viimastel aastatel vahemikku 5-8 °C [6].

2.1.2. Tuul

Tuuleenergia kõige olulisem parameeter on tuulekiirus. Eestis on keskmiseks tuulekiiruseks 3,7 m/s. Kõige suuremad aasta keskmised tuulekiirused jäävad saartele ja rannikualadele jõudes 5-6 m/s piirkonda, sisemaal on need väiksemad jäädes 2,5-4 m/s piirkonda[13]. Kõige suurem mõõdetud keskmine kuu tuulekiirus on 11,9 m/s, detsember 1898, Sõrve [8]. Üldiselt ei ületa tuuled kiirusi üle 35 m/s.



Joonis 2.3. Tallinn-Harku meteoroloogiajaam keskmised päevade tuulekiirused [7].

Joonisel 2.3. on Tallinn-Harku meteoroloogiajaama mõõdetud tuulekiiruste andmed, mis kinnitavad reeglit, et sisemaal on tuulekiirused madalad. Jooniselt on ka näha tuulekiiruste erinevusi kellaaegadest sõltuvalt. Selgub et suurimad langused kuude lõikes on tuulekiirustel öötundidel kell 18.00 – 06.00 vahemikus ja väiksemad päevastel aegadel. Sellest järeldub, et tuuleenergia produktiivsuse kõikumine kellajaliselt on sarnane päikeseenergia omaga. Erinevused tulevad sisse aga talve ja suveperioodi võrdlusel, kus suvekuudel on päikese energiat rohkem ja talvekuudel on rohkem tuule energiat. Keskmiste tuulekiiruste kõikumine kuude lõikes peaks olema ka väiksem võrreldes päikeseenergiaga.

2.2. Tarbijad

Selleks, et arvutada vajalik elektritootmise võimsus ja salvestamise maht on esiteks vaja kindlaks teha, kui palju on elektritarbijaid ja mis on nende võimsustarbed. Sealt edasi saab arvutada päevatarve ja kuutarved ning nende põhjal juba sobilikke energiasüsteemi komponente valida. Siinkohal on oluline arvestada nii keskmise tarbimisega kui ka

tippvõimsustega. Tippvõimsusi mitte arvestades võib tekkida süsteemi ülekoormusi ja avariilisi väljalülimisi. Seadmetel, mis on mõeldud aastaringseks kasutamiseks antakse sageli andmetelehel ainult aastane energiatarve. Näiteks külmikul on see tihti ainus näitaja, samas mõnel teisel seadmel nagu veekeetja antakse ainult võimsus. Tabelis 2.1 on välja toodud peamised tarbijad mille hulgast paljud enamus majapidamistes olemas ja arvutatud kõikidele seadmetele indikatiivselt kõik näitajad.

Tabel 2.1. Tarbijad koos näidisvõimsuste ja tööajaga millest on arvutatud ka päevatarve

Tarbija	Võimsus (W)	Tööaeg (h)	Päevatarve (kWh)	Kuutarve (kWh)
Külmik	40	24	0,96	28,8
Valgustus	500	3	1,5	45
Pump	700	1	0,7	21
Internet	60	20	1,2	36
Teler	87	4	0,4	10
Digiboks	3,1	4		
Arvuti	200	6	1,2	36
Nõudepesumasin	3000	2	6	22
Boiler	1500	3	4,5	135
Pesumasin	890	1	0,89	26,7
Röster	900	0,17	0,15	4,5
Mikrolaineahi	800	0,25	0,20	6
Elektripliit -ja ahi	1500 + 9800	1	0,99	30
Veekeetja	1980	0,17	0,33	10
Kohvimasin	1000	0,5	0,5	15
Õhksoojuspump	2930	2	5,8	174
tolmuimeja	750	1	0,75	22,5

Märkus: Tabeli andmed on võetud erinevatest allikatest nagu internetipoed ja tootjate kodulehed ning andmed on hinnangulise täpsusega.

Lisaks tarbijate üldisele tööajale ja energia tarbimisele on mõistlik eristada neid ka elektri tarbimise ajastuse põhjal. Tarbijaid saab liigitada nihutatavate koormustega tarbijateks ja mittenihutatavate koormustega tarbijateks. Liigituse aluseks on võime nihutada tarbija elektritarbimise aega ilma selle funktsiooni häirimata ning liigseid ebamugavusi tekitamata. Põhilised nihutatava koormusega tarbijad on küttesüsteemid, eesotsas boileriga. Mittenihutatava koormusega tarbijad on need elektriseadmed, mis vajavad oma eesmärgi täitmiseks samal ajal elektri tarbimist nagu elektripliit, arvuti, televiisor jms.

See liigitus on oluline süsteemide planeerimisel, sest optimeerides nihutatavate koormustega seadmete tööaega on võimalik saavutada efektiivsuse kasv.

2.2.1. Tarbimisandmete analüüs

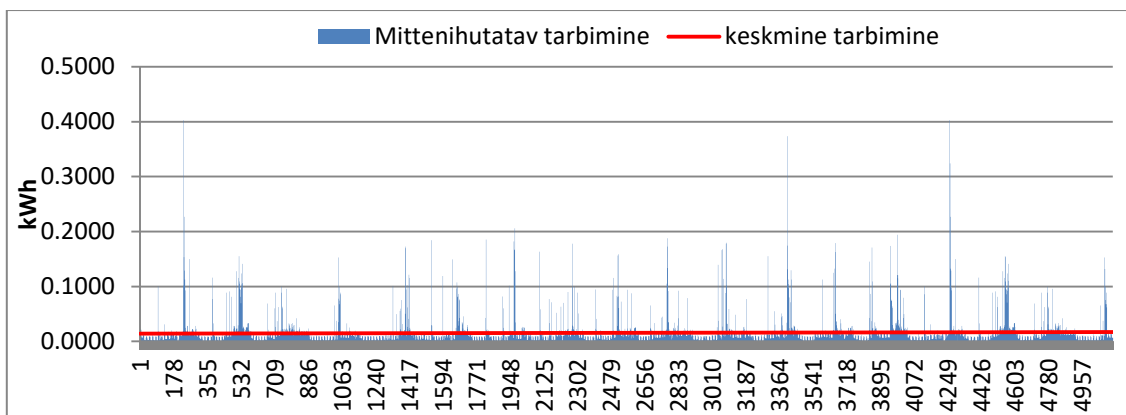
Eeldame väike elamu tüüpiliseks energiavajaduseks päevas vahemiku 5-15 kWh. Selle kinnitamiseks kasutasime Alo Allku poolt mõõdetud kahe nädala tarbimise andmeid [26] tema kaasautori Andres Annuk'i loal [27]. On arvestatud, et need andmed vastavad 160 m² elamu ja nelja liikmelise perekonna vajadustele. Mõõdetud on 5 minutiliste vahedega. Mõõteandmeid sai töödeldud programmiga Microsoft Excel. Mõõteandmete töötlemise tulemused on välja toodud tabelis 2.2.

Tabel 2.2. Nelja elanikuga 160 m² eramu elektritarbimisandmed

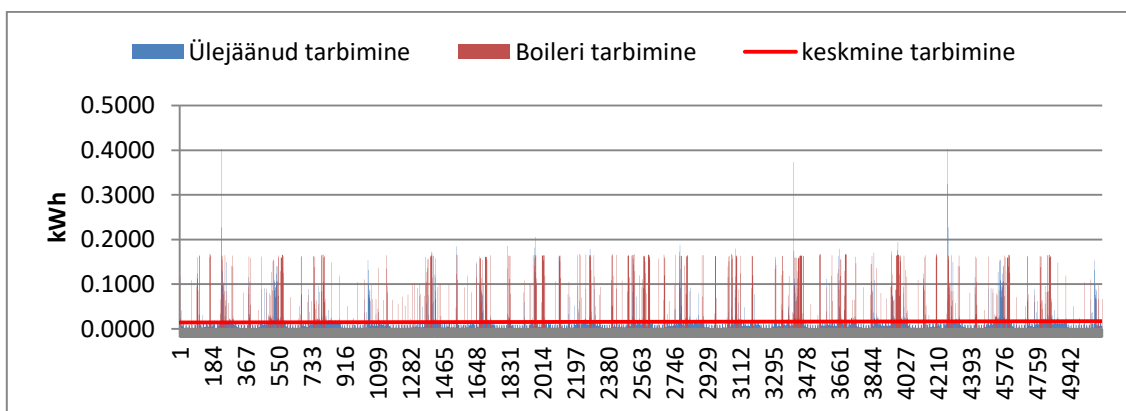
Boiler	Aasta	Kuu	Päev	Max	Min	Keskmine
kWh	1840,7	153,4	5,03	0,17	0,00	0,02
kW				2,02	0,00	0,21
Teised tarbijad	Aasta	Kuu	Päev	Max	Min	Keskmine
kWh	1632,3	136,1	4,46	0,40	0,00	0,02
kW				4,83	0,01	0,19
Tarbimine kokku	Aasta	Kuu	Päev	Max	Min	Keskmine
kWh	3473	289,4	9,49	0,57	0,00	0,03
kW				6,85	0,01	0,40

Tabelis 2.2 on andmed koondatud näitamaks aasta, kuu ja päeva keskmisi tarbitud energia hulkasid. Lisaks on välja toodud mõõdetud maksimaalsed, minimaalsed ja keskmised koormused, mis vastavad 5 minutiliste intervallide keskmistele suurustele.

Joonistel 2.4. ja 2.5. on kujutatud tarbimist, kus x-teljel on minutid ja y-teljel vastavalt tarbitud energia hulk kWh. Punase joonega on kujutatud tarbimise keskmist väärtust selle aja jooksul. Joonis 2.4 langeb kokku tabeli 2.2. keskmiste veergudega, kus on teiste tarbijate koormused. Joonis 2.5. langeb kokku tabeli 2.2. alumiste veergudega, kus on kujutatud kogutarbimist.



Joonis 2.4. Tarbimine kahe nädala jooksul kWh, ilma boilerita.



Joonis 2.5. Kogutarbimine kahe nädala jooksul kWh.

Joonisel 2.5. on lisatud ka boileri tarbimine. On näha, et boileri tarbimise jaotumine on perioodilisem, kui teiste tarbijate tarbimise jaotumine, kuna tegemist on ühe suure seadmega. On näha, et kuigi boileri keskmine energiatarbimine on suurem, siis tippkoormused on väiksemad. Kõige olulisem osa andmete analüüsist on tähelepanek, et tarbimise võimsus on suure amplituudiga ning tippvõimsused ületavad tava väärtusi mitmekordselt.

2.3. Energia tootjad

2.3.1. Päikesepaneelide parameetrid

Tarbimisandmete analüüsist selgub, et vajaduste rahuldamiseks peaks energiasüsteem suutma välja anda igapäevaselt ligikaudu 10 kWh energiat. See tähendab, et seadmete kuu energiatootlikus peaks jääma vahemikku 300-400 kWh. Kõigepealt arvutame sellise süsteemi parameetrid ainult päikeseenergiat kasutades. Päikeseenergia abil elektrit tootes PV-paneelidega on olulised näitajad paneelide pindala ja võimsus. Pindala põhiseks arvutamiseks kasutame valemit, mis hetkel keskendub paneelide kasutegurile ja päikese kiirguse kogusele jättes välja paneelide võimsuse.

$$A_{Pa} = \frac{E}{t E_{Pä} k_{Pä}} , \quad (2.1.)$$

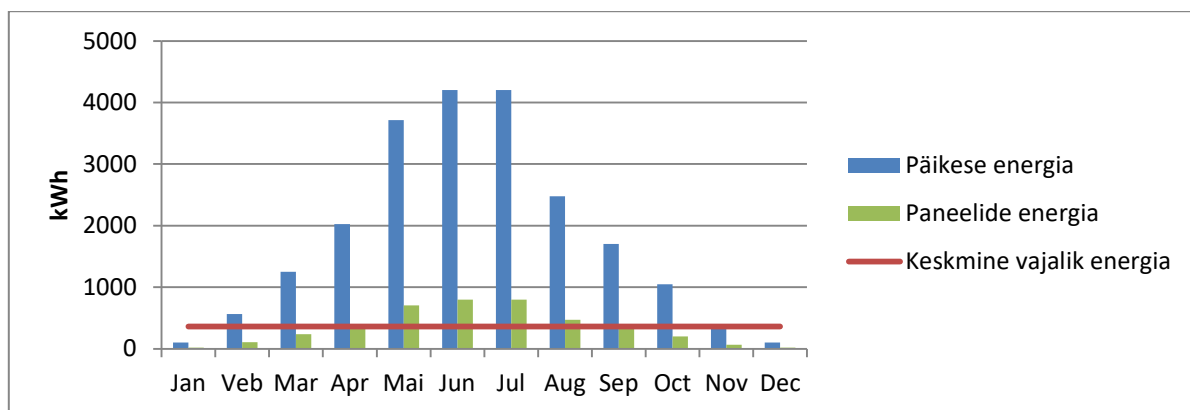
kus E_t on päikesepaneelide tootlikus kWh, t on päikesetundide arv aastas (h), $E_{Pä}$ on päikese kiirguse aasta keskmine väärtus (kWh/m²), A_{Pa} on päikesepaneelide kogupind (m²) ja $k_{Pä}$ on päikesepaneelide efektiivsus protsentides.

Valemi (2.1.) abil vajalikku päikesepaneelide kogust arvutades kasuteguriga 19% tuleb aasta keskmiseid päikese energia väärtusi kasutades sobilikuks päikesepaneelide pindalaks 25 m². Keskmise väärtuse kasutamine on aga ekslik, sest nii tabelist 2.3. kui ka joonist 2.6. vaadates on näha, et sellise eelduse puhul on suvise ja talvise tootlikuse vahe üle kümne korra ja talveperioodil jääb tegelikult võimsust liialt väheks, et süsteem funktsionaalne oleks tagatud ja suveperioodil on suur üle tootmine, et *Off-Grid* süsteem ei saa üleliigset energiat võrku müüa. Keskmiste päikeseenergia väärtuste rakendamiseks peaks olema süsteemis väga pikaajalised ja võimsad energiasalvestid, mis on ebamõistlikult kallis. Tabelis 2.3. on välja arvutatud kuude kaupa paneelide tootlikused võttes arvesse kuude päikesetundide ja päikese kiirguse koguse erinevused. Tabelis olevad väärtused ei ole absoluutsed ja kõiguvad igal aastal.

Tabel 2.3. Potentsiaalse tootlikuse andmed PV-paneelidele kasuteguriga 19%

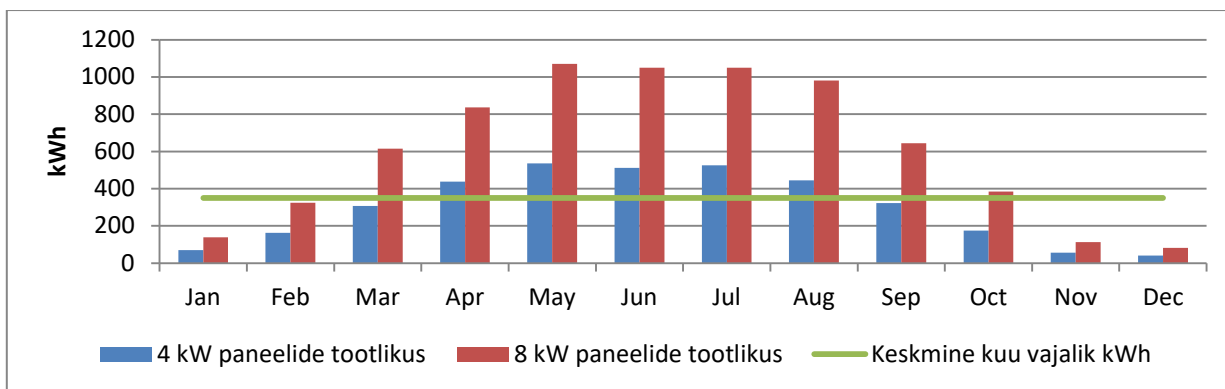
	Päikesetunde kuus (h)[14]	Päikeseenergia kuu keskmine väärtus (kWh/m ²)[14]	Kuu päikesekiirguse summaarne kogus (kWh/m ²)	25m ² PV-paneelide tootlikus päevas (kWh)	25 m ² PV-paneelide tootlikus kuus (kWh)
jan	40	0,1	4	0,6	19
veb	90	0,25	22,5	3,6	106,9
mar	125	0,4	50	7,9	237,5
apr	180	0,45	81	12,8	384,8
mai	270	0,55	148,5	23,5	705,4
jun	280	0,6	168	26,6	798
jul	280	0,6	168	26,6	798
aug	220	0,45	99	15,7	470,3
sept	170	0,4	68	10,8	323
okt	120	0,35	42	6,7	199,5
nov	70	0,2	14	2,2	66,5
dec	40	0,1	4	0,6	19
aastas kokku	1885	4,45	869		4127,9
aasta keskmine	157,1	0,4	72,4	11,5	344

Joonisel 2.6. on kujutatud päikesepaneelide energiatootlikust pindala ja kasuteguri kaudu. Pindalaga 25 m² ja 19 % kasuteguriga ränikristall PV-paneelide võimsus on ligikaudu 4 kW.



Joonis 2.6. Potentsiaalse tootlikuse andmed kWh, 25 m² PV-paneelidele kasuteguriga 19 %.

Teostades arvutusi vabavaraga PVGIS tulevad joonisega 2.6. sarnased tulemused joonisel 2.7.



Joonis 2.7. PV-gis, 4 kW ja 8 kW paneelide tootlikus kWh.

Joonisel 2.7 on võrdluseks 4 kW ja 8 kW süsteemide tootlikus, mis mõlemal juhul suvekuudel ületab normi ja talvekuudel jääb normist kõvasti allapoole. Võimsamat süsteemi võib õigustada kevad ja sügisperioodidel normi täitmine. Väiksema võimsusega süsteemist jääb ka kevad ja sügisperioodil väheseks. Kuigi Joonis 2.7. on koostatud joonisest 2.6 erineva andmebaasi päikeseenergia koguste põhjal on näha, et tulemused on sarnased.

2.3.2 Elektrituulikute parameetrid

Elektrituuliku parameetrite leidmiseks on vaja tuuliku tootlikust kohalikul tuulekiirusel. Erinevate väiketuulikute andmed on välja toodud tabelisse 2.4.

Tabel 2.4. Tuulikud koos tähtsamate parameetritega [19,20,25]

					Britwind R9000	Tuge 10	SD3
Tuuliku nimetus	Britwind R9000	Tuge 10	SD3	V m/s	kWh aastas	kWh aastas	kWh aastas
Nimivõimsus P_n (kW)	5	9,9	3	4	4963	10000	3000
Nimituulekiirus V_n (m/s)	11	11	11	5	9167	25867	6000
Tiiviku diameeter (m)	5,5	10,2	3,9	6	13653	35012	8000
Helitugevus (dB(A))	42,9	43,7		7	17899	42011	10000

Tabelis on kujutatud tuulikute aastast tootlikust erinevatel tuulekiirustel, mis on võetud tuulikute andmetelehelt. Selgub, et 10 kW võimsusega tuulik võib olla liialt võimas ühe 5000 kWh –tunnise aastase tarbimisega elamu jaoks. Samas 3 kW tuulikul jääb 4 m/s keskmise tuulekiiruse juures tootlikus liialt madalaks. Tabelist on näha, et tuulekiiruse tõusul >5 m/s peale peaks ka 3 kW võimsusega tuulik olema piisavalt tootlik. Tuultekiirustel 4 m/s lähedal on 10 kWh-se päevase energiatarvega eramu jaoks tabeli järgi kõige sobilikum 5 kW võimsusega tuulik. Tuulekiiruse jäämisel allapoole 4 m/s ei ole mõistlik võtta tuulikut ainukeseks energia allikaks.

2.4. Energia salvestid

Energia salvestite parameetrid sõltuvad tarbimisest ja tootmisest. Salvesti parameetrite arvutamiseks saab kasutada erinevaid meetodeid. Hea võimalus salvestite arvutamiseks on võtta aluseks ööpäeva keskmine energia tarbimine ja selle põhjal arvestada, mis parameetritega akupank peaks olema. Kuigi see pole kõige täpsem ja paremini opimeeritud lahendus on see kõige kindlam lahendus. Kuna energia tootmises võib esineda mitme päevaseid katkestusi tasuks arvestada akupangaga, mis suudab elamut elektriga varustada rohkem, kui üks päev. Salvestite arvutamisel akupanga tühjenemise sügavus sõltub suuresti akutüübist ja soovitud akupanga elueast ning peaks olema alati arvutustes sees. Vajalikust mahtuvusest suurema mahtuvusega akupanga soetamine on kasulik salvestusseadme eluea pikendamise mõttes.

Võtame päeva keskmiseks energiatarbimiseks E_{Tar} 10 kWh. Võttes vajaliku koguse energia tagamiseks 3 päeva ja akupanga mahutavuse tühjenemisastmega 50 % tuleb akupanga energia mahutavuseks E_c :

$$E_c = \frac{E_{Tar} \cdot 3}{0,5} = 60 \text{ kWh} \quad (2.2.)$$

Sellest edasi arvutame ka akupanga mahutavuse C , Ah. Selle arvutamiseks on vaja akupanga pinget U_c , mille võtame praegu 48 V.

$$C = \frac{E_C}{U_C} = 1250 \quad \text{Ah} \quad (2.3.)$$

Tabelis 2.5. järgneb ühe energiasüsteemi jaoks mõeldud süvatsükkliakupanga koostamise näide koos maksumusega ja olulisemate parameetrite välja toomisega.

Tabel 2.5. Näidislahendus 60 kWh 36 V akupangale [21]

Nimetus	Trojan SIND 02 1990
Akutüüp	Süvatsükkli uputatud pliiaku
Pinge	2V
Mahutavus 20 tunnise tühjenemise ajaga	1547Ah @ 20h
Maksumus	630 €
Vajalik kogus	24
Akupanga maksumus	15 120 €

Tegelik maksumus on mõnevõrra suurem, sest lisanduvad komplekteerimiseks vajalike juhtmete, laadijate jms kulud ja hoolduskulud. Akupanga valikul on oluline osa arvestada ka maksimaalse laadimisvooluga, mida energia tootjad suudavad välja anda. Liialt suurte voolutugevustega tekivad juhtmetes energiakaod. Kõrgem pinge vähendab juhtmetes kadusi. Sellest tulenevalt kehtib ka reegel, et võimsamad süsteemid toimivad kõrgema pinge peal.

2.5. Sobilikud parameetrid

Tabelis 2.6. olevad andmed on programmiga HOMER pro energiamajanduse simuleerimiseks vajalikud sisendparameetrid. Parameetrid on tuletatud töö eelnevates osades olevatest andmetest. Enamus vajalikest muutujatest on HOMERI-is oma andmebaasides olemas koos ligilähedaste maksumustega. Tulemuste täpsustamiseks on parem kasutada võimalikult palju kohalikkude parameetritega sarnaseid väärtusi.

Kuigi tegemist on põhjaliku programmiga on sel omad piirangud. Kuna programmi peamine eesmärk on süsteemi majanduslikult kasuliku versiooni suunas optimeerimine on keeruline sealt kätte saada vajalikke andmeid, sest on raske piirata optimeerimise parameetreid. Parim viis tulemusi mõjutada on katsetada erinevate muutujatega juhtumeid. Muutujate vahemikud on tabelis 2.6. tulpades.

Tabel 2.6. Sobilikud sisendandmed HOMER pro arvutusuteks

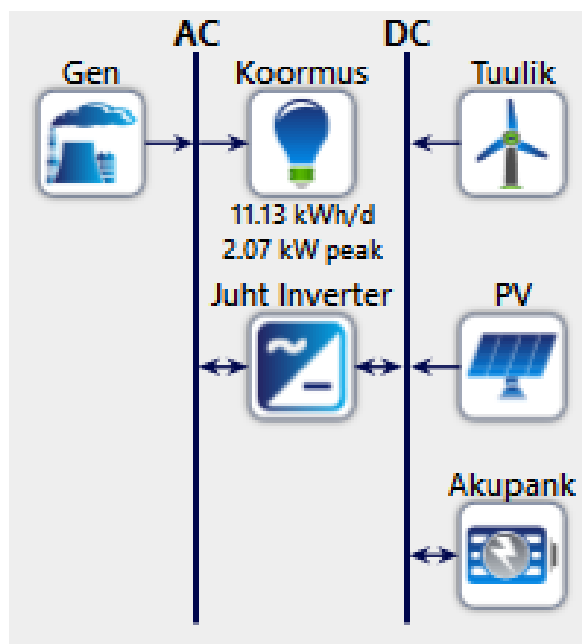
Diiisellgeneraatori maksumus ühe kW võimsuse kohta	Tuulik võimsus ja maksumus	Keskmine tuule kiirus	PV-paneelide maksumus ühe kW võimsuse kohta	Aku mahutavus ja maksumus	Tarbimine
90 €	3 kW @ 16 200 €	3,7 m/s	900€	1547 Ah @ 18 000€	9 kWh
180€	5 kW @ 31 500 €	4,2 m/s	1350€	3000 Ah @ 31 500€	10 kWh
270€	10 kW @ 45 000 €	4,7 m/s	1800€	1 kWh @ 270€	11 kWh
360€		5,2 m/s	2150€	1 kWh @ 540€	12 kWh
450 €		5,7 m/s			13 kWh

Tabelis on tulpade kaupa erinevad Eestis asuva 10 kWh tarbisega elamule sobilikumad parameetrid. Esimeses tulbas on erinevad maksumused olenevalt generaatori kvaliteedist. Generaatori kütuse hinnaks valime kõikidele simulatsioonidele ühiselt 1,55 €. Tuuliku võimsused peaks sobima vahemikus 3 – 10 kW ja nendele on lisatud indikatiivsed maksumused. Keskmise tuulekiirus sõltub asukohast ja tuuliku masti kõrgusest lähtuvad arvutuseks realistlikud kiirused on tabelis 2.6. HOMER ei vaja PV paneelide võimsust, vaid ühe kW paneeli maksumust, paneelide optimaalse võimsuse arvutab programm ise. Sarnaselt on lood akudega, kuigi akude puhul on võimalik valida konkreetseid reaalseid akusi, mis on andmebaasis olemas lisaks 1 kWh maksumusele. Viimaseks oluliseks osaks on tarbimise kogused, mis tuleb programmi sisestada päevase keskmise kWh kogusena. Programmis on võimalik eraldi välja tuua ka boileri ja mittenihutatava koormusega tarbijate võimsused, kuid selle töö raames seda ei tehta, sest see on selle uurimustöö eesmärki vähe mõjutav ja liialt mahukas lisaparameter.

3. SOBILIKE KOMPONENTIDEGA SÜSTEEM

3.1. Süsteemi skeem

Lõpptulemusena võiks energiasüsteemi skeem sisaldada vajalikke tootmiseadmeid, akupanka, kontrollereid ja juhtinverterit optimeeritud võimsustega tarbimisvajaduste rahuldamiseks. Joonisel 3.1. on HOMER Pro programmiga tehtud skeem. Programm kasutab asukohapõhist andmebaasi, et sobilike kliimaandmetega teostada arvutusi erinevate tootjate osakaalude korral energia maksumusest, süsteemi tasuvusest ja taastuvenergia osakaalust. Arvutused said teostatud erinevate parameetritega ja nende kombinatsioonidest valitud sobilikumad tulemused on kõik võimalikult suure taastuvenergia osaga.



Joonis 3.1. Energiasüsteemi skeem HOMER Pro.

Joonisel olev skeem sisaldab tuulikut ja PV- paneele, kui primaarseid energiaallikaid ja diisलगeneraatorit varuenergia allikana. Skeemil ei ole märgitud tuuliku inverterit ja kontrolleri ja PV- paneelide kontrolleri, kuna need on komplektis tootjatega. Juhtinverter suudab muundada AC/DC vahel ja kontrollida akude laadimisvoolu parameetrid. Joonisel ei ole ka eraldi märgitud nihutatavate ja mittenihutatavate tarbijate koormusi, kuna see pole hetkel oluline.

3.2. Näidis süsteemi parameetrid, komponendid ja maksumus

Reaalsetest komponentidest näidissüsteemi alustuseks võtame päevaseks keskmiseks energia tarbimiseks 10 kWh. Siit edasi lisame tarbimisele 10 % selleks, et kindlustada piisavalt võimsust. Sellega on uus baas tarbimine 11 kWh.

Akupanga elemendiks sobib väga hästi Trojan SIND 06 1225 süvatsükkli uputatud Plii-happeaku. Mahutavusega 1159 Ah, 72 tunnise tühjenemisajaga, elemendi pingega 6 V ja maksumusega 1100 € [22].

Võttes soovitud akupanga poolt energiatagamise limiidiks 2 päeva ja akupanga tühjenemise astmeks 40% tuleb akupanga mahutavus:

$$E_c = \frac{2 \cdot 11\,000}{0.4} = 55\,000 \text{ Wh} \quad (3.1.)$$

Järgides reeglit, et suuremale süsteemile on parem suurem pinge võtame süsteemi pingeks 48V, saab kasutada 8 Trojan SIND 06 1225 elementi jadaühenduses, et koostada sobilik akupank.

$$E_c = 6 \cdot 8 \cdot 1159 = 55\,632 \text{ Wh} \quad (3.2.)$$

Eelnevates peatükkides paika pandud parameetrite põhjal (joonis 2.7) valime PV-paneelide võimsuseks 4 kW. Sellise võimsusega süsteemi jaoks sobib 16 BISOL BXO-350 XL 260 W

päikesepaneeli maksumusega 250 € [23]. Ühendatud omavahel 2x8 tuleb paneelide väljund võimsus 4 040 W ja pinge 277,6 V.

Sellise võimsusega ja pingega olukorda sobib kontrolleri Sunny Boy 5.0 maksumusega 1300€. Tasub valida vajalikust pisut võimsam kontrolleri kuna madalamatel temperatuuridel esineb paneelidel pinge kasv [24].

Tuulegeneraatoriks valime SD6 6k kW võimsusega tuuliku, mis peaks seatud tingimusi arvestades olema hea valik võimaldades 4 m/s juures keskmise tuulekiirusega aastast tootlikust 4000 kWh lähedal [29]. Tuulik SD6 on võimsuskõveraga, mille tootlikus kasvab juba madalamatel kiirustel ja võimsusega 6 kW ei ole see süüsteemile liialt võimas. Tuuliku maksumus koos kontrolleri ja inverteriga tuleb kuskil 30 000 €.

Kuigi tagavarageneraatoriks piisab ka madalama võimsusega generaatorist on hea kui on olemas võimekus vajadusel suuremaks võimsuseks. Seepärast valime 6 kW võimsusega elektrikäivitusega generaatori Powersmart G6000E maksumusega 1500 €. Võimalik, et generaatori autonoomseks kasutamiseks on vajalik selle juurde monteerida ka juhtkontroller. Ülevaade kogu süsteemi maksumuse kohta on koondatud tabelisse 3.1. Süsteemi on veel vaja juhtinverter/laadimiskontrollerit milleks sobib Sma Sunny Island 6.0h-12 Inverter/Charger maksumusega 2700€ [16].

Tabel 3.1. Energiasüsteemi põhikomponentide maksumuse ülevaade

Komponent	Akupank	PV paneelid	PV kontrolleri	Tuulikusüsteem	Juhtinverter	Varu generaator	Kokku
Maksumus, €	9000	3500	1300	30 000	2700	1500	48 000

Nendele kuludele lisaks peab arvestama ka akupanga hoolduskuludega ja muude süsteemi komponentide kuludega nagu juhtmestik jms. Sellise energiasüsteemi tegelik maksumus on lähemal 60 000 €.

3.3. HOMERI abil arvutatavad võrdlusparameetrid

Programm HOMER pro võimaldab simuleerida energiasüsteemi toimimist selliselt, et ette antud parameetrite raames optimeeritakse energia tootjate ja salvestite vahelkordasid ja võimsusi eesmärgiga saavutada madalaim maksumus või tasuvusaeg erineva taastuvenergia kasutamise osakaalu (*Renewable fraction*) ja taastuvenergia ära kasutamise teguri (*Renewable Penetration*) korral.

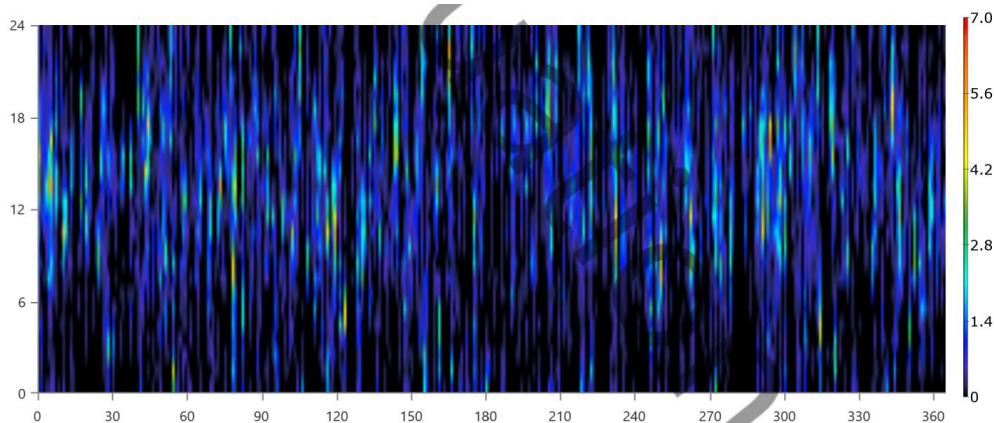
$$f_{ren} = 1 - \frac{E_{nonren}}{E_{served}}, \quad (3.1.)$$

kus f_{ren} on taastuvenergia kasutamise osakaal %, E_{nonren} on mittetaastuvenergia tootmine kWh/aasta, E_{served} on täielik elektriline tarbimine aastast kWh/aasta [28].

Selle töö eesmärgiks on saavutada võimalikult odav süsteem võimalikult suure taastuvenergia kasutamise osakaaluga. Parima taastuvenergia ära kasutamise teguri (*Renewable Penetration*) saavutamine, mis on maksimaalne hetkvõimsuste suhe on vähemtähtis ja selles töös jätame selle välja. Lisaks nendele teguritele ja majanduslikule analüüsile näitavad HOMERI simulatsioonide tulemused ka paljusi süsteemi elektrilisi näitajaid. Meile neist olulisemad on erinevate süsteemi komponentide aastane tootlikus kWh/aasta, tootmise võimsused ajasammuga 1 tund aasta jooksul, kW, akupanga laetuse astme muutumine ajasammuga 1 tund aasta jooksul, % ja akupanga süsteemile autonoomse energiaproduktiooni kestus tundides h.

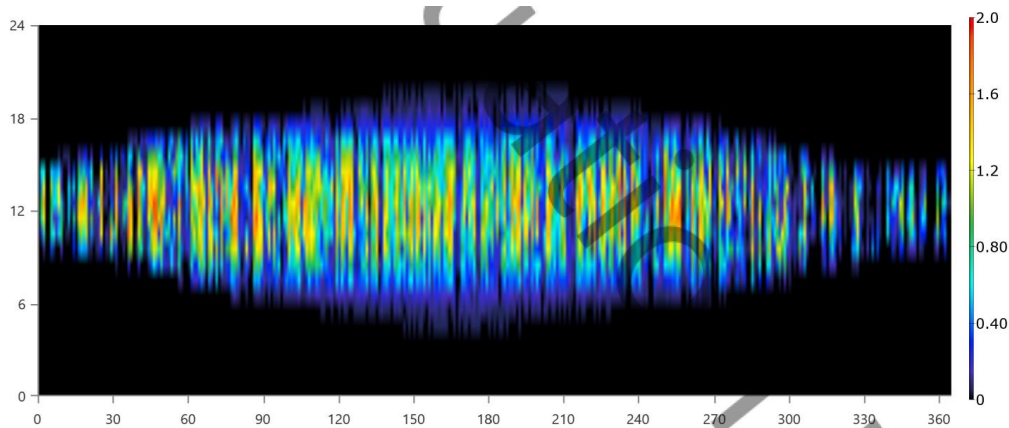
3.4. HOMERIGA arvutatud süsteemi parameetrid

HOMERIGA arvutatud parameetrid on koondatud süsteemi analüüsiks joonistele ja joonisel 3.2 on kujutatud elektrituuliku tootmisvõimsust aasta jooksul kellajaliselt. Vasakul y-teljel on kellaeg, x- teljel on päevad aastast ja paremal on värviskaala 0 – 7 kW. HOMERI simulatsiooniks valitud Bergery Excel 6 on sarnane tuulikule SD6, mida HOMERIS ei ole.



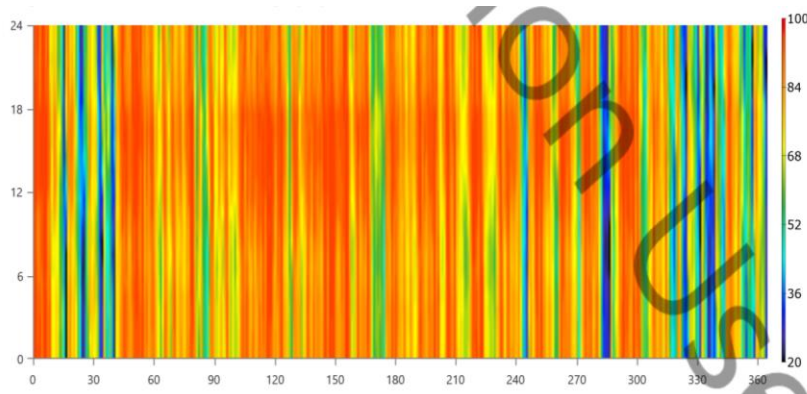
Joonis 3.2. Bergery Excel 6 elektrituuliku võimsused ajasammuga 1 tund kW, aastane produktiivsus 4000 kWh.

Joonisel 3.3 on kujutatud päikesepaneelide tootmisvõimsust aasta jooksul kellajaliselt. Vasakul y-teljel on kellaaeg, x- teljel on päevad aastas ja paremal on värviskaala 0 – 2 kW. PV- paneelide näidissüsteemist kaks korda madalama võimsuse optimeeris HOMER.

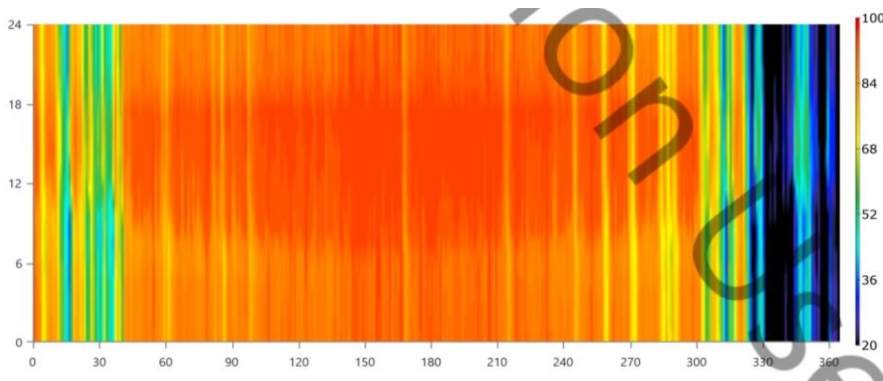


Joonis 3.3. 2 kW PV- paneelide võimsused ajasammuga 1 tund aasta jooksul kW, keskmine päevane produktiivsus 5,5 kWh /d, aastane produktiivsus 2000 kWh.

Joonistel 3.4 ja 3.5 on kujutatud aku laetuse taset aasta jooksul kellajaliselt. Vasakul y-teljel on kellaaeg, x- teljel on päevad aastas ja paremal on värviskaala 0 – 100 %.



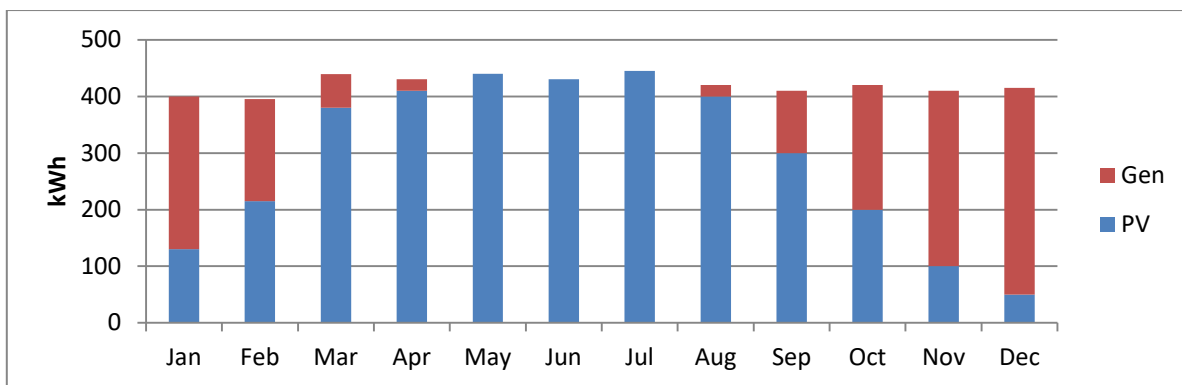
Joonis 3.4. Trojan SIND 06 1225 elementidest akupanga laetuse aste %, mahutavusel 41,2 kWh



Joonis 3.5. Trojan SIND 06 1225 elementidest akupanga laetuse aste %.

Joonisel 3.4. olev laetuse aste tuleb jooniste 3.2 ja 3.3 koostootmise võimsusest. Sellise koormusega peaks akupanga eluiga HOMERI andmetel olema 30 aastat ja peaks süsteemile tagama akupanga jõul töötamise autonoomsuse 72 tunniks. Vähesel määral nimelt 111 tundi aasta jooksul oli vaja ka 2,3 kW võimsusega diisलगенераatori toetust aastase tootlikusega 200 kWh. Süsteemi inverteri võimsuseks opimeeris HOMER 2,7 kW. Selle süsteemi võimekuses on 97% ulatuses taastuva energia kasutamine ehk $f_{ren} = 97\%$. Selline süsteem oli 3,8 m/s tuulekiirusega simuleeritud süsteemidest kõige optimaalsem süsteemi maksumusega 72 000 €.

Joonisel 3.5 on kujutatud võrdluseks 10 kW PV-mooduli ja 3 kW võimsusega tuulegeneraatori tööd akupanka. Sellises süsteemis kaob tuuliku mõte ja on kasulikum asendada see natuke võimsama generaatoriga, et oleks võimalik vähendada akupanga mahutavust ja vältida tootlikuseta perioode. Generaatoriga süsteemi võimsused on joonisel 3.6.



Joonis 3.6. Päikesepaneelide võimsusega 3,7 kW ja diisलगeneraatoriga võimsusega 2,3 kW süsteemi tootlikused kuude kaupa kWh.

Joonisel 3.6 on kujutatud PV- paneelide ja diisलगeneraatori süsteemi mille optimeeris HOMER Süsteem f_{ren} teguriga 60 %. Sellise süsteemi puhul on see aksepteeritav tulemus. Teguri suurendamiseks peaks tõstma paneelide ja akupanga võimsusi.

Kuna eesmärgiks on saavutada võimalikult suur osakaal taastuvenergiast tuleb järeldada, et tuulekiirustel 4 m/s lähedal minimaalne tuuliku võimsus peab olema suurem kui 5 kW. Samas ei ole 5000 kWh aastase tarbimise juures mõttekas tõsta tuuliku võimsust suuremaks kui 10 kW, sest siis läheks liialt palju energiat raisku. HOMER pro arvutused kinnitavad, et tuulekiirusel alla 5 m/s on tuulikute produktiivsus pigem madal, mis teeb nende kasutamise primaarse energiaallikana mittesoovitavaks.

Suurema tuuliku asemel päikesepaneelide võimsuse suurendamine on sarnase efektiga, kui on päikesepaneelide võimekuse asendamine suurema tuulikuga. Kuigi niipidi on mõjud väiksemad tuuliku aastaringse ühtlasema tootlikuse tõttu, ei kao ära toodanguta perioodid ja liialt suure toodanguga perioodid joonis 3.5. Kõige parem tundub olevat väikese varuga tasakaalus süsteem, kus mõlema tootja osakaal on nõutud energiamahust vähemalt 50%. Süsteemi f_{ren} teguri väärtus üle 90 % on piisavalt hea, sest sellisel juhul töötab varugeneraator harva. Üritades saavutada f_{ren} tegurit väärtusega 100% suurenevad ka akupanga ning päikesepaneelide võimsused, mis teeb süsteemi maksuvuse kõvasti suuremaks ja ei ole mõistlik.

Võttes võrguga ühenduse korral ühe kWh-ni keskmiseks hinnaks 6 eurosent on ilmselge, et majanduslikku kasu keegi oma võrguga ühendatud elamu võrgust lahti ühendamisega ei saa. Sellisel juhul on võrgus aastase 5000 kWh energia maksumus 300 € ja süsteemi maksuvusega 72 000 € tasuvusaeg on üle 200 aasta. Samas võrguga liitumise tasu kohas, kus see puudub on tõenäoliselt kordades suurem kui 72 000 €. Sellises olukorras on mõttekas taastuvenegiapõhine energiasüsteem ehitada.

Majanduslik tasuvus on hetkel tehtav ainult võrguga ühenduse korral vähendades vajadust akupanga järele ning kasutades võimalust võrku energiat müüa ja sellega tasuvusaega vähendada. HOMERI simulatsioonide käigus selgus ka, et vähendades taastuvenegi osa ainult päikesepaneelidele ja kasutades puudujääkide tasatamiseks diisel generaatorit on süsteemi maksumus ilmselt suurusjärgult rohkem kui poole võrra odavam.

HOMERI simulatsioonid toetavad ka fakti, et kõige suurem pudelikaal sarnastes energiasüsteemides on endiselt energia salvestamise tehnoloogia.

KOKKUVÕTE

Töö esimeses osas kinnitasime, et ei ole uusi turgumuutvaid tehnoloogiaid ja ennast tõestanud taastuenergia tehnoloogiate maksuvused jätkuvalt langevad. Kõige uuenduslikum leitud tehnoloogiatest on katusekividenä kasutatavad PV-paneelid. Kuigi see tehnoloogia on veel värske on sellel palju potentsiaali ennast tõestada.

Töö teises osas kogutud parameetritest olid kõige tähelepanuväärsemad väiketuulikute tootlusesd madalamatel tuulekiirustel 4 m/s lähedal, mis mõjutasid soovitud eesmärgi saavutamist kõige rohkem. Võib välja tuua ka andmete puuduse nii madalamatel tuulekiirustel elektrituulikute tootlikuste kohta. Tavaliselt hakkavad tuulikute andmetelehtedel parameetrid alates tuulekiirusest 5 m/s harvem ka 4 m/s.

Kolmandas osas tehtud näidis süsteemi koostamise juures oli kõige keerulisem sobilike komponentide ja nende parameetrite leidmine. Simuleerimine HOMER pro programmiga näitas üllatavalt häid tulemusi võimaldades 97 % ulatuses taastuenergia mahuga energiatootlikuse aastaringsest madala tuulekiirusega tuule ja päikese abil. Pärast töö teises osas tehtud järeldusi ei tundunud see realistlikuna. Samas on süsteemi tasuvusaeg liialt suur, et seda majandusliku kasu nimel rakendada juhul, kui on olemas võrguga ühendamise võimalus.

Simuleeritud 97 % ulatuses taastuenergiat kasutav süsteem koosnes 6 kW võimsusega tuulikust aastase tootlikusega 4000 kWh, 2 kW võimsusega PV-paneelidest aastase tootlikusega 2000 kWh, 2,3 kW võimsusega diisलगенерааторист aastase tootlikusega 200 kWh ja akupangast mahutavusega 41,2 kWh. Lisaks oli olemas süsteemile sobilik juhtinverter, mille optimaalseks võimsuseks seadis HOMER 2,7 kW. Süsteemi hinnanguline maksumus on 72 000 €.

Töö tulemusena võib järeldada, et elamu täielik autonoomne energiavarustus on Eestis mõistlik kasutades PV-paneele ja elektrituulikut ainult juhul, kui pole võimalust võrguga ühenduseks. Energiavarustuseks paremate tuule või päikese tingimustega on mõeldav sarnase töö tegemine küla või väiksema linna tasemel. Taastuenergia suurimaks pudelikaelaks on endiselt energia salvestamise tehnoloogiate puudujäägid.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Eesti energiamajanduse arengukava aastani 2030. (2015). Tallinn. https://energiatalgud.ee/img_auth.php/5/5b/ENMAK_2030._Eelnõu_13.02.2015.pdf (06.08.2019).
2. Eesti Energia. Päikeseelekter, näidislahendused. [veebileht] <https://www.energia.ee/elekter/paikeseelekter/eraklient> (06.08.2019).
3. **E, Risthein.** (2013). Energiatehnika ja maailm. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool elektrotehnika instituut.
4. Tesla. Tesla Solarroof. [veebileht] https://www.tesla.com/en_EU/solarroof (13.06.2019).
5. **Pinn, M., Pinn, R., Pinn, M.** (2012). Elekter päikesest ja tuulest: Lood inimestelt ja kasulikud vihjed ise elektri tootmiseks. Tallinn: MTÜ Kolm Kobrast.
6. Riigi ilmateenistus. Climate, annual temperature. [veebileht] <https://www.ilmateenistus.ee/kliima/climate-maps/temperature/annual/?lang=en> (02.08.2019).
7. **Rosin, A., Link, S., Hõimoja, H., Drovtar, I.** (2015). Energiasalvestid ja -salvestustehnoloogiad. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool elektrotehnika instituut.
8. Riigi ilmateenistus. Kliima, rekordid. [veebileht] <https://www.ilmateenistus.ee/kliima/rekordid/tuul/> (02.08.2019).
9. BlueSky Energy. GREENROCK saltwater energy storage. [veebileht] <http://www.bluesky-energy.eu/en/greenrock-saltwater-energy-storage/> (13.06.2019).
10. Tesla. Tesla powerwall. [veebileht] https://www.tesla.com/en_EU/powerwall (13.06.2019).
11. **Gipe, P.** (2004). Wind power renewable energy for home, farm and business. USA, Vermont: Chelsea Green Publishing.
12. Riigi ilmateenistus. Sunshine. [veebileht] <https://www.ilmateenistus.ee/kliima/climate-maps/sunshine/?lang=en> (13.06.2019).

13. Riigi ilmateenistus. Kliimanormid, tuul. [veebileht]
<https://www.ilmateenistus.ee/kliima/kliimanormid/tuul/> (13.06.2019).
14. **Kallis, A., Russak, V.** (2003). Eesti kiirguskliima teatmik. Tallinn: Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituut. [on-line] http://www.ilmateenistus.ee/wp-content/uploads/2013/01/eesti_kiirguskliima_teatmik.pdf (13.06.2019).
15. **Põder, V.** (2011). Compatibility of energy consumption with the capacity of wind generator. Tartu: Eesti Maaülikool. [on-line]
<https://dspace.emu.ee/xmlui/bitstream/handle/10492/145/Thesis?sequence=1&isAllowed=y> (13.06.2019).
16. Europe Solarshop. SMA Sunny Island 6.0H- 12 [veebileht] <http://www.europe-solarshop.com/inverters/sma/sma-sunny-island/sma-sunny-island-6-0h.html>
(02.08.2019).
17. Eesti Tuuleenergia Assotsiatsioon. Mis on väiketuulik. [veebileht]
<http://www.tuuleenergia.ee/%20vaiketuulikud/mis-on-vaiketuulik/> (02.08.2019).
18. Eesti Tuuleenergia Assotsiatsioon. Asukoha valik. [veebileht]
<http://www.tuuleenergia.ee/vaiketuulikud/asukoha-valik/> (02.08.2019).
19. SD Wind Energy. SD3 Wind Turbine. [veebileht] <https://sd-windenergy.com/small-wind-turbines/sd3-3kw-wind-turbine/> sd3 tulegeneraator (06.08.2019).
20. Britwind. R9000. [veebileht] <http://www.britwind.co.uk/our-windmills/the-r9000>
(06.08.2019).
21. Solaris. Trojan SIND 02 1990 Solar Industrial Flooded 2V 1990Ah Battery. [veebileht]
<https://www.solaris-shop.com/trojan-sind-02-1990-solar-industrial-flooded-2v-1990ah-battery/> (06.08.2019).
22. AltE Store. Trojan SIND 06 1225 (IND17-6V) Solar Industrial Line-Deep-Cycle Flooded Batter. [veebileht] <https://www.altestore.com/store/deep-cycle-batteries/flooded-lead-acid-batteries/trojan-sind-06-1225-ind17-6v-solar-industrial-line-deep-cycle-flooded-battery-p9704/> (06.08.2019).
23. Päikeseenergia. Päikesepaneel BISOL BXO-350 XL. [veebileht]
https://paikeseenergia.ee/Paikesepaneel/p%C3%A4ikesepaneel-BISOL_suurXL_350Wp?filter=38 (08.08.2019).

24. Europe-solarshop. SMA Sunny Boy 5.0-1AV-40. [veebileht] <http://www.europe-solarshop.com/inverters/sma/sma-sunny-boy/sma-sunny-boy-5-0-1av-40.html> (08.08.2019).
25. TUGE. TUGE10 Elektrituulik. [veebileht] <https://www.tuge.ee/products/tuge10> (10.08.2019)
26. Allik, Alo; Märss, Maido; Uiga, Jaanus; Annuk, Andres (2016). Optimization of the inverter size for grid-connected residential wind energy systems with peak shaving – Renewable Energy, 99, 1116–1125.
27. Annuk, Andres; Jõgi, Erkki; Lill, Heiki; Kalder, Janar; Hovi, Mart; Pihlap, Heino; Jasinskias, Algirdas; Härm, Mihkel; Trashchenkov, Sergei; Allik, Alo (2018). Augmentation of Self-Consumption of Electricity by Using Boilers and Batteries for Residential Buildings – Proceedings of 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications: 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications, Paris, 14.-17.10.2018. Ed. Ilhami Colak. Paris: ICRERA, 256–260.
28. HOMER. Taastuenergia kasutamise tegur. [veebileht] https://www.homerenergy.com/products/pro/docs/3.13/_renewable_fraction.html (24.06.2019).
29. SD-Windenergy. SD6 Elektrituulik. [veebileht] <https://sd-windenergy.com/small-wind-turbines/sd6-6kw-wind-turbine/> (01.08.2019)

Mina, Andres Kaljuste, sünniaeg 15.12.1993,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö
Autonoomne katkematu energiavarustus väikeelamule, mille juhendaja on Andres Annuk,

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega
isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor: Allkirjastatud digitaalselt

(allkiri)

Tartu, 21.08.2019

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

Andres Annuk: Allkirjastatud digitaalselt

21.08.2019

(juhendaja nimi ja allkiri)